



Universitatea Națională de Știință și Tehnologie POLITEHNICA București
Școala Doctorală de Inginerie Energetică

Rezumat teză de doctorat

Cercetări teoretice și experimentale asupra fiabilității instalațiilor de comprimare gaze naturale folosite în energetică

Doctorand: *ing. CS III Andrei- Robert Isac*

Comisia de doctorat:

Președinte	Prof.dr.ing. Radu PORUMB- U.N.S.T. Politehnica București
Conducător	Prof.em.dr.ing. Dan Niculae ROBESCU- U.N.S.T. Politehnica București
Referent	CS I dr.ing. Valentin SILIVESTRU- I.N.C.D. Turbomotoare COMOTI
Referent	Prof. dr. ing. Valentin PETRESCU- Univ. "Lucian Blaga" Sibiu
Referent	Prof.dr.ing Bogdan POPA- U.N.S.T. Politehnica București

București - 2025

Cuprins

Cuvânt înainte.....	3
Descrierea, importanța subiectului și semnificația lucrării	3
1. Stadiul actual al domeniului fiabilității	3
1.1 Noțiuni de fiabilitate	4
1.2 Fiabilitate teoretică, constructivă, experimentală și operativă	5
1.3 Legi de repartiție ale fiabilității și domeniul lor de aplicabilitate	5
2. Mentenanță și fiabilitate electrocompresoare cu șurub	6
2.1 Metode de diagnosticare a defecțiunilor	7
2.2 Defecțiuni apărute în timpul funcționării	8
2.3 Parametri asociați funcționării compresoarelor.....	8
3. Modelări și simulări în funcționarea compresoarelor.....	9
3.1 Studiul funcționării unei linii de comprimare	9
3.1.1 Gradul de încărcare	9
3.1.2 Nivelul de vibrații	10
3.1.3 Temperatura.....	11
3.2 Simulări ale fiabilității pentru compresoare cu șurub	12
3.3 Variații ale parametrului de formă, β , utilizând legea Weibull.....	13
3.4 Legea propusă de autor	14
3.5 Valori minime și maxime ale fiabilității compresoarelor	16
4. Cercetări experimentale în funcționarea compresoarelor	16
4.1 Experimentări compresor C3	16
5. Concluzii generale	18
6. Contribuții originale ale autorului	18
7. Direcții de cercetare în viitor.....	19
Lista lucrărilor publicate și activitate profesională	19
Bibliografie.....	20

Cuvânt înainte

Deși temele ce abordează teme de fiabilitate sunt nenumărate, prezenta lucrare își propune să aducă un aport important asupra calculului de fiabilitate al compresoarelor cu șurub, utilizate în industrie. Ca urmare a activității de mentenanță și a datelor obținute, s-au realizat în capitolul 3, modelări și simulări ale funcționării compresoarelor cu șurub, prin monitorizarea unor parametri deosebit de importanți, și înglobarea lor într-o lege nouă de tip Weibull.

Ultimul capitol scoate în evidență utilizarea legii propuse de autor, în contextul compresoarelor cu șurub studiate de acesta, care aduce nivelul de predicție al fiabilității la un nivel apropiat de valorile experimentale măsurate în activitatea de mentenanță, cu erori de până la 5%, comparativ cu abordarea clasică.

Descrierea, importanța subiectului și semnificația lucrării

Autorul are o experiență vastă de 12 ani în domeniul tehnic, specializându-se în repararea și întreținerea compresoarelor cu șurub. În cadrul acestei activități, a întâmpinat situații care l-au forțat să dezvolte și să implementeze soluții inovative. Una dintre aceste provocări, a fost necesitatea de a crea un program de mentenanță eficient pentru electrocompresoare.

Pentru a realiza acest lucru, autorul a fost nevoit să genereze o funcție de fiabilitate $R(t)$, care să permită monitorizarea și evaluarea performanțelor compresoarelor în timp. Această funcție de fiabilitate a devenit esențială pentru a stabili perioadele optime de întreținere preventivă și pentru a minimiza riscul defecțiunilor neașteptate. Astfel, autorul a reușit să asigure o durată de viață crescută și o funcționare cu eficiență ridicată a echipamentelor, contribuind în mod semnificativ la creșterea productivității și reducerea costurilor de operare.

Pe parcursul activității de mentenanță a electrocompresoarelor cu șurub, autorul a identificat o serie de probleme recurente în funcționarea acestor echipamente. Analiza detaliată a activităților și monitorizarea riguroasă a echipamentelor, a permis documentarea principalelor defecțiuni observate. (1)

1. Stadiul actual al domeniului fiabilității

Echipamentele de comprimare a gazelor naturale (Fig.1.1) sunt destinate atât parcurilor de exploatare în industria petrolului, dar și cu alte destinații; acestea sunt echipate, în domeniul studiat, cu compresoare cu șurub. Pentru industria petrolieră, aceste instalații sunt amplasate în parcurile de comprimare a gazelor naturale asociate extracției petrolului brut, sau în apropierea sondelor de extracție gaze. (2)



Fig. 1.1 Electrocompresor montat în parc de extracție gaze (3)

Analiza complexă a tuturor parametrilor funcționali cât și utilizarea echipamentelor de monitorizare a stațiilor de comprimare gaze naturale, cu acest tip de construcție unică, utilizate strict în aplicația menționată, constituie o noutate, care, analizată corespunzător, va putea evolua într-un program cât mai corect de mentenanță cu ajutorul analizei fiabilității. (4)

1.1 Noțiuni de fiabilitate

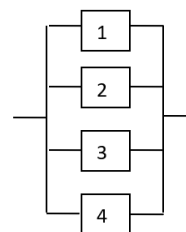
Estimarea apariției defectelor la un timp determinat, este esențială pentru planificarea defectării echipamentelor, instalațiilor sau utilajelor. Aceasta presupune stabilirea unei durate de viață prestabilite pentru toate componentele lor. Un astfel de tip de proiectare optimizează funcționarea utilajului analizat.

În vederea observării cât mai aprofundate a datelor, se va utiliza fiabilitatea sistemelor și ipotezele de funcționare ale unui sistem. (5) (6) (7) (8)

Structura ansamblului pieselor de pe un anumit circuit poate fi realizată în mai multe moduri:



*Fig. 1.2 Elemente legate în serie
[imagine autor]*



*Fig. 1.3 Elemente legate în paralel
[imagine autor]*

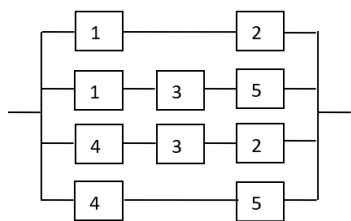


Fig. 1.4 Elemente legate în paralel
[imagine autor]

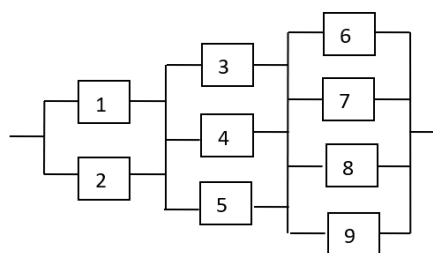


Fig. 1.5 Elemente legate în paralel- serie
[imagine autor]

1.2 Fiabilitate teoretică, constructivă, experimentală și operativă

- a) Fiabilitatea previzională** reprezintă capacitatea de a estima și previziona comportamentul fiabilității unui ansamblu sau subansambluri într-o perioadă de timp.
- b) Fiabilitatea experimentală** este stabilită în laborator pe prototipuri, serii zero și/sau piese-epruvetă, folosind standuri de încercare și teste de fiabilitate.
- c) Fiabilitatea operațională** (sau efectivă) reprezintă capacitatea unui sistem, echipament sau proces tehnologic de a funcționa conform specificațiilor tehnice, fără căderi, în parametri normali de lucru, într-un anumit interval de timp.

1.3 Legi de repartiție ale fiabilității și domeniul lor de aplicabilitate

Adaptarea legii de repartiție a defectelor este o decizie complexă și dificilă, dar esențială. Această decizie se bazează pe datele obținute despre schimbările care au loc în interiorul componentelor înainte de apariția defectiunii și pe studiul continuu al modului în care procesul se apropie de defectare.

1.3.1 Legea de repartiție Poisson. Legea de repartiție Poisson este o lege de tip discret purtând denumirea și de legea evenimentelor rare, deoarece probabilitatea de apariție a defectului (evenimentului) este mică. Dacă în cadrul unei măsurări a unui număr de elemente, intervalul de apariție a defectului se consideră a fi foarte mare (defecțiunile reprezintă evenimente rare) repartiția Poisson va fi enunțată prin densitatea de probabilitate $P(k)$

1.3.2 Legea de repartiție exponențială. Legea de repartiție exponențială se bazează pe ideea că probabilitatea de defectare într-un anumit interval de timp este proporțională cu lungimea intervalului Δt și nu depinde de cât timp a trecut de la începutul funcționării, ci doar de faptul că sistemul a funcționat fără probleme până la acel moment.

1.3.3 Legea de repartiție normală. Distribuția normală, cunoscută și sub numele de distribuție Gaussiană, este una dintre cele mai importante distribuții în statistică și

probabilitate. Ea este utilizată pentru a descrie date care se distribuie simetric în jurul unei medii și are formă de clopot. Se poate aplica pentru a monitoriza și îmbunătăți procesele de producție.

1.3.4 Legea de repartiție Weibull. Distribuția Weibull este una flexibilă, care poate modela diverse forme de curbe de rată de defectare, fiind determinată de doi parametri, formă și scară. Este folosită pe scară largă în ingineria fiabilității pentru modelarea timpului până la defectare al componentelor și sistemelor. Poate reprezenta faze diferite ale ciclului de viață: perioade de mortalitate infantilă, perioade de uzură sau perioade intermediare de viață utilă.

1.3.5 Legea de repartiție gamma. Ca aplicație, este utilizată în modelarea timpului până la cădere pentru componente cu variabilitate mare în ratele de defectare și este utilă datorită flexibilității sale în a modela diverse scenarii și comportamente variate ale echipamentelor.

1.3.6 Legea de repartiție Rayleigh. Se utilizează în cercetarea fenomenului de uzură a sculelor așchietoare și este o derivată a repartiției Weibull atunci când $\beta = 2$. Legea de repartiție Rayleigh este utilizată în diverse domenii pentru modelarea fenomenelor în care variabila de interes depinde de mai multe componente independente și identic distribuite.

1.3.7 Legea de repartiție Alpha. Legea se utilizează în modelarea fiabilității sculelor așchietoare din exploatare și în condiții de laborator. Legea de repartiție Alpha ajută la evaluarea și anticiparea performanței sculelor, determinând probabilitatea ca acestea să funcționeze corect pe o anumită perioadă de timp.

1.3.8 Legea de repartiție binomială. Legea se aplică în situația în care un oarecare element se defectează în urma unui anumit număr de cicluri. Legea de repartiție binomială este utilă în sondaje, controlul calității, experimente medicale și ajută la estimarea probabilităților și la luarea deciziilor bazate pe rezultate experimentale.

2. Mentenanță și fiabilitate electrocompresoare cu șurub

În domeniul mentenanței echipamentelor de comprimare, autorul a întâlnit o varietate de probleme, care pot afecta funcționarea optimă a acestor echipamente. Intervențiile efectuate în câmpurile de operare ale compresoarelor au fost atât intervenții neplanificate (intervenții de urgență) cât și reparații planificate conform Manualului de Întreținere și Exploatare. Căderile echipamentelor sunt clasificate conform capitolului 2.2, acolo unde se menționează natura defectiunilor (mecanice, electrice/ automată etc) cu exemplificări pentru fiecare tip în parte.

2.1 Metode de diagnosticare a defecțiunilor



Fig. 2.1 Analiza nivelului de vibrații.
Analizor vibrații Viber X1- măsurat nivel
vibrații compresor

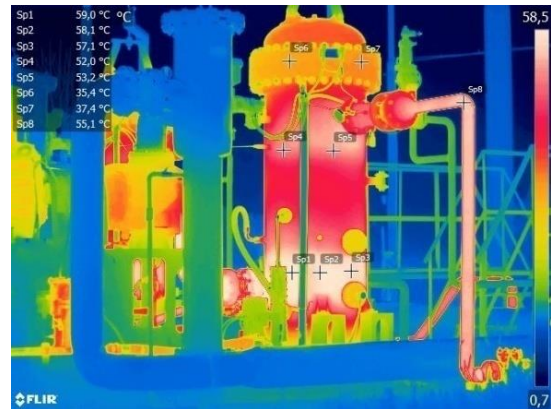


Fig. 2.2 Analiza termografică. Vedere în
infraroșu vas separator gaz- ulei



Fig. 2.3 Analiza prin boroscopare.
Vizualizare interioară stare roți melcați



Fig. 2.4 Analiza lubrifianților.
Echipament portabil pentru analiză ulei



Fig. 2.5 Analiză zgomot. Distribuția câmpului acustic - Activități de mentenanță ale
autorului în locația compresorului studiat- Valori măsurate în dB [decibeli].
Măsurările au evidențiat faptul că zona cu radiația acustică cea mai mare a fost
carcasa compresorului.

2.2 Defecțiuni apărute în timpul funcționării

Defecțiunile sunt atât universal valabile, cât și identificate de autor în urma activității de mentenanță. Aceste categorii includ (9):

- a) Defecțiuni mecanice;
- b) Defecțiuni electrice/ electronice (sau automatică);
- c) Defecțiuni provocate de factorul uman;
- d) Defecțiuni datorate mediului ambiant;

2.3 Parametri asociați funcționării compresoarelor

a) Gradul de încărcare. Gradul de încărcare al instalației de comprimare este determinat de parametrii de intrare și ieșire, în condițiile utilizării în parcurile de comprimare gaze naturale sau asociate asupra cărui domeniu se reflectă prezentul studiu. Presiunea de aspirație și temperatura gazului aspirat au o influență directă asupra procesului de comprimare, compresoarele utilizate fiind de tip volumetric.

b) Nivelul de vibrații . Nivelul de vibrații este considerat cel mai bun parametru de identificat pentru determinarea condițiilor dinamice, cum ar fi echilibrul (vibrația generală), defectele lagărului și solicitările componentelor. Multe defecțiuni mecanice se manifestă ca vibrații excesive

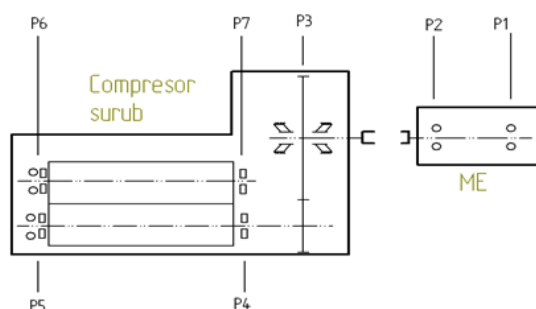


Fig. 2.6 Dispunerea punctelor de măsură a nivelului de vibrații pe compresor și motorul de antrenare (3)

c) Temperatura compresorului în zona refulării. Funcționarea acestor echipamente de comprimare a gazelor generează căldură (prin principiul termodinamic de funcționare), iar în unele cazuri pot apărea puncte fierbinți și radiații infraroșii care pot fi detectate prin imagini termice. Cauzele acestor radiații pot fi variate: coroziune, pene de curent, frecare excesivă între piesele metalice aflate în mișcare relativă, scurgere de fluid fierbinte, depășirea temperaturii lagărelor, debit mic de ulei etc. Legea de distribuție de tip Weibull, propusă de autor, în condițiile utilizării parametrilor măsurați de temperatură, va fi:

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t}{\theta}\right)^{\beta}} \cdot e^{-tt} \quad (2.1)$$

unde:

$$tt = \frac{\text{temperatura de lucru (măsurată)}}{\text{temperatura de oprire a echipamentului}} \quad (2.2)$$

3. Modelări și simulări în funcționarea compresoarelor

Există multe situații în care apariția defecțiunilor nu poate fi caracterizată nici cu ajutorul legii normale și nici cea exponențială, dat fiind faptul că sunt rezultatul unor repartiții de amestec, datorate unor elemente care se regăsesc în perioada de uzură, în timp ce altele nu au intrat în perioada de viață utilă. În vederea analizei unei astfel de situații, repartiția Weibull oferă o repartiție caracterizată de densitatea $f(t, \eta, \beta, \gamma)$, aplicabilă pentru timpul până la prima defecțiune.

3.1 Studiul funcționării unei linii de comprimare

A fost efectuată monitorizarea unei linii de comprimare gaze (ansamblu electrocompresor) alcătuită din două compresoare cu șurub (unul de joasă și unul de înaltă presiune), acestea fiind interdependente. Studiul a presupus urmărirea parametrilor de încărcare, nivel de vibrații și temperatură compresor (măsurată în zona refulării).

3.1.1 Gradul de încărcare

Luând în considerare cele două compresoare, a fost monitorizat curentul consumat de acestea în funcționare, urmând în cele ce urmează, să fie definite nivelurile de încărcare.

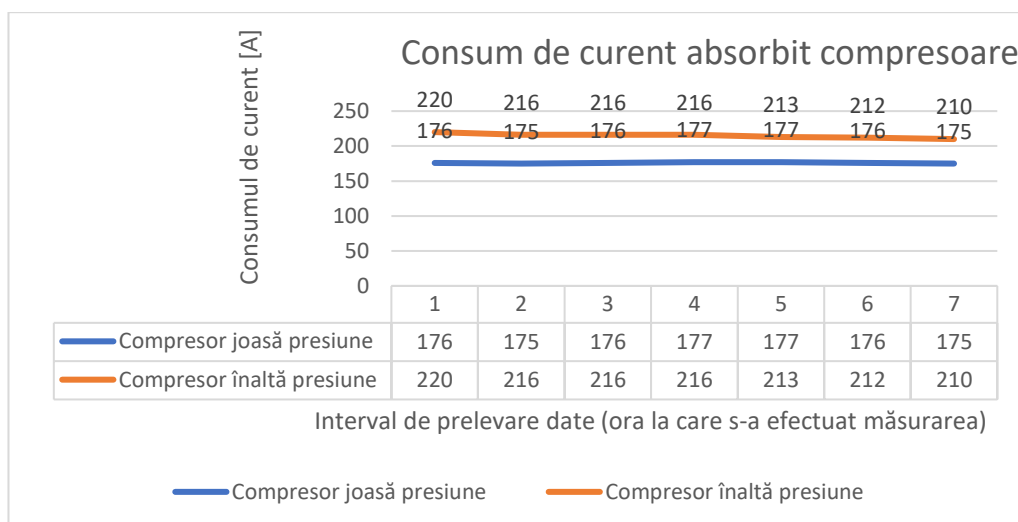


Fig. 3.1 Consumul de curent al unei linii de comprimare [imagine autor]

Pentru calculul puterii consumate de către motorul electric se va folosi formula:

$$P = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos \varphi \quad (3.1)$$

Puterea consumată de compresoarele de joasă și înaltă presiune

Tabel 3.1

Timp (ora)	08:00	09:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00
Compresor nr. 1 P [kW]	92,33	91,81	92,33	92,86	92,86	92,33	91,81
Compresor nr. 2 P [kW]	112,37	110,32	110,32	108,79	108,79	108,28	107,26

Gradul de încărcare poate avea, în cazul echipamentelor studiate, valori cuprinse între 70 % și 100%, și rareori utilizare la regim pe termen scurt de peste 100%. Utilizarea acestor valori în distribuția Weibull cu parametri suplimentari, propusă de autor, va avea ca notație ω , unde:

$$\omega = \frac{\text{nivel de încărcare compresor}}{100} \quad (3.2)$$

Astfel, funcția propusă de autor va lua valoarea următoare:

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t}{\theta}\right)^{\beta}} \cdot e^{-(\omega-1)} \quad (3.3)$$

unde: θ - media timpului de bună funcționare (MTBF) și t - perioada de operare.

Utilizând formula de mai sus (3.2), propusă de autor, gradul de încărcare al compresoarelor va fi:

Grad de încărcare al compresoarelor de joasă și înaltă presiune (ω)

Tabel 3.2

Ora	08:00	09:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00
Compresor nr. 1	0,839	0,835	0,839	0,844	0,844	0,839	0,835
Compresor nr. 2	0,851	0,836	0,836	0,824	0,824	0,820	0,813

3.1.2 Nivelul de vibrații

În cazul aplicării de parametri suplimentari în distribuția Weibull, se poate identifica în funcție de puterea consumată de echipament, următoarea situație aplicabilă în zonele de lucru:

- Instalație medie (grupa 2) cu puteri cuprinse între 15 kW și 300 kW (conform ISO 10816-3). În aplicațiile studiate, acesta este cel mai întâlnit caz, astfel că există următoarea relație propusă de autor

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t}{\theta}\right)^{\beta}} \cdot e^{-(v-1)} \quad (3.4)$$

Autorul, pe baza experienței acumulate în decursul activității, propune completarea legii Weibull cu parametrul e^v , deosebit de important în analiza corectă a fiabilității instalațiilor de comprimare gaze naturale.

unde:

$$v = \frac{\text{nivel vibrații măsurat [mm/s]}}{4,5\text{mm/s}} \quad (3.5)$$

Limitarea nivelului de vibrații la 4,5 mm/s pentru fundație flexibilă, conform ISO 10816-3, în condițiile operării restricționate. Introducerea acestor limite este de o importanță majoră, tocmai datorită faptului că pe baza rezultatelor obținute, instalația de comprimare poate fi oprită, minimizând cât mai mult defectele ce pot surveni în cazul apariției unui nivel ridicat de vibrații.

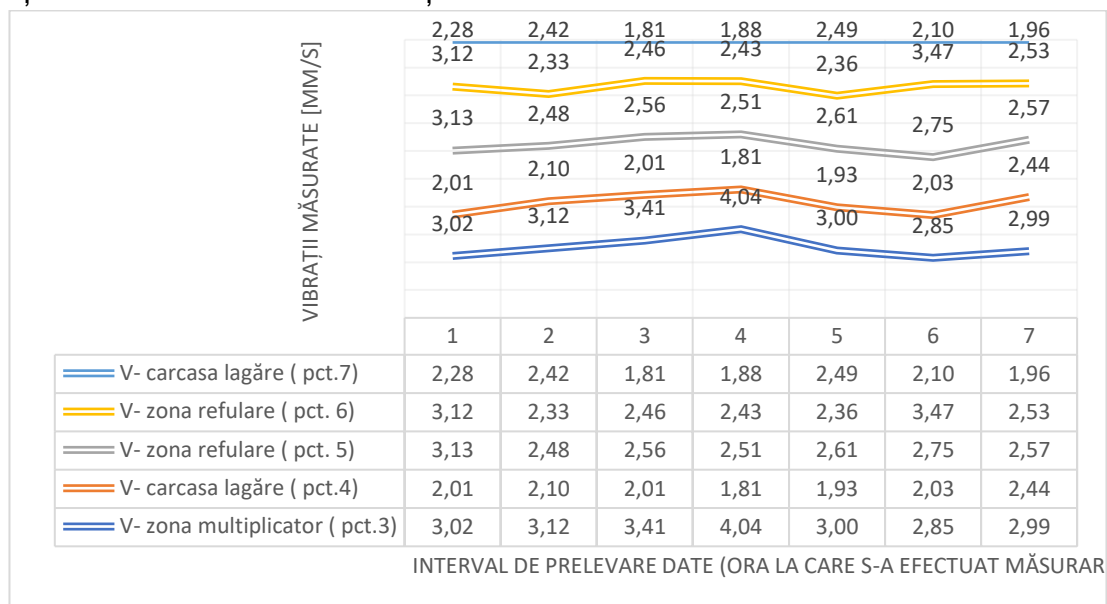


Fig. 3.2 Vibrații măsurate pe unitatea de comprimare (plan vertical) [imagine autor]

3.1.3 Temperatura

Legea de distribuție de tip Weibull propusă de autor în condițiile utilizării parametrilor măsurați de temperatură, va fi:

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t}{\theta}\right)^{\beta}} \cdot e^{-tt} \quad (3.6)$$

Parametrul suplimentar “ tt ” poate avea diferite valori în funcție de echipamentul studiat (motor electric, compresor, actionări electrice, pompe, răcitoare de ulei, vase separatoare etc).



Fig. 3.3 Analiza termografică unitate de comprimare

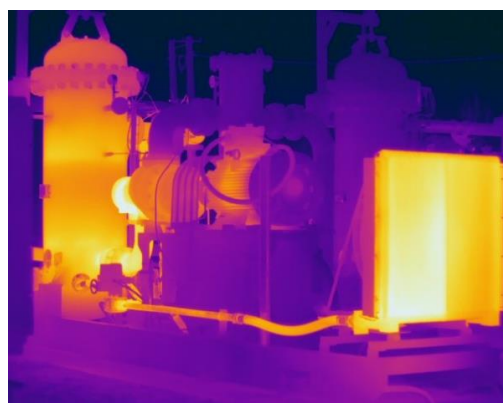


Fig. 3.4 Analiza termografică skid comprimare joasă presiune

3.2 Simulări ale fiabilității pentru compresoare cu șurub

Simulările permit evaluarea performanței compresoarelor în diferite condiții de operare. Acest lucru ajută la optimizarea designului și la identificarea parametrilor critici care influențează eficiența și fiabilitatea. (10) (11) (12)

În vederea analizei fiabilității echipamentelor de comprimare, au fost studiate 3 compresoare de același tip, dar cu performanțe diferite. Au fost monitorizate în operare timp de peste 4 ani, fapt ce a permis identificarea principalilor parametri de lucru care influențează funcționarea echipamentelor.

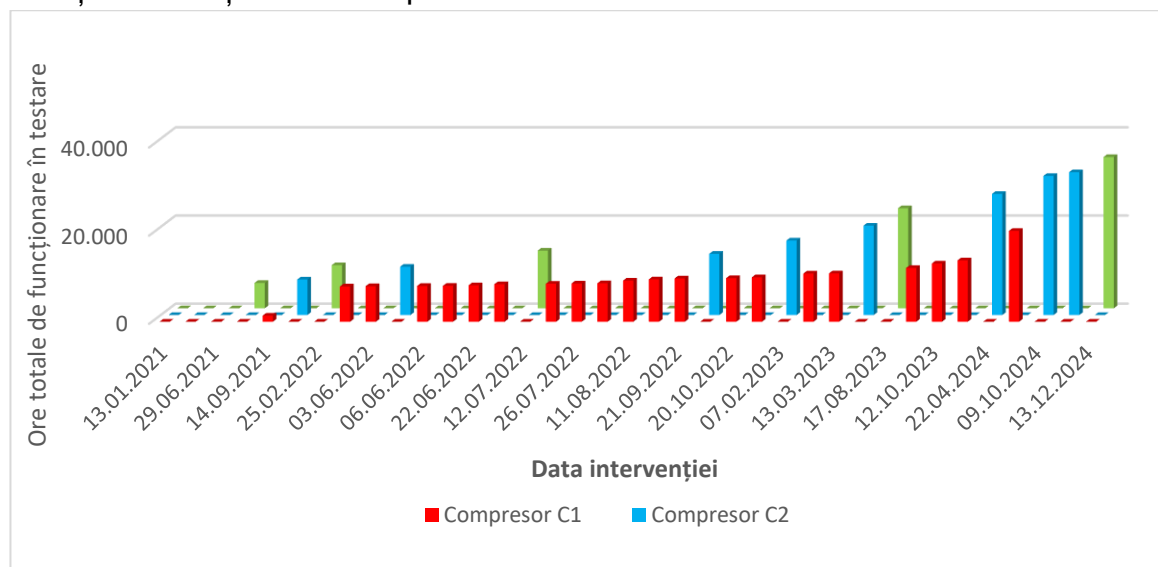


Fig. 3.5 Intervenții compresoare C1, C2 și C3 [imagine autor]

Ținând cont de cele menționate anterior, se poate calcula Media Timpului de Bună Funcționare, și anume θ , pentru cele trei compresoare studiate, iar în funcție de aceasta se calculează rata căderilor, definită ca:

$$\lambda = \frac{\text{Numărul de căderi}}{\text{Timpul de operare (cicli)}} = \frac{1}{\theta} \quad (3.7)$$

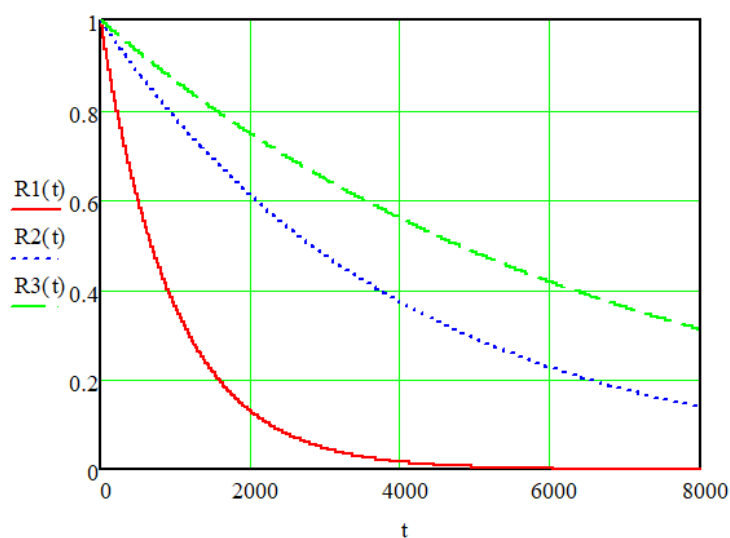
Rezultă că media timpului de bună funcționare și rata căderilor sunt cele menționate în tabelul 3.3.

Media timpului de bună funcționare al compresoarelor testate

Tabel 3.3

Timpi de funcționare/ compresor	Compresor C1	Compresor C2	Compresor C3
M.T.B.F.	981	4.049	6.864
λ (căderi pe ora de funcționare)	0,00101922	0,00024695	0,00014569

Dacă valoarea lui t se alege ca fiind un interval de 8.000 ore (în cazul prezentat- RC1- Reparație Curentă 1) care este egală cu un an de funcționare continuă, rezultă o fiabilitate a echipamentului conform următorului grafic:



Timpul (ore de functionare)

Fig. 3.6 Fiabilitatea instalației utilizând legea Weibull clasică [imagine autor]
unde: $R_1(t)$ - Funcția de fiabilitate pentru compresorul C1; $R_2(t)$ - Funcția de fiabilitate pentru compresorul C2; $R_3(t)$ - Funcția de fiabilitate pentru compresorul C3.

Astfel că, dacă se iau următoarele valori ale lui t , se poate obține fiabilitatea echipamentului la o perioadă, dată conform tabelului 3.4.

Fiabilitatea echipamentului C3 prin analiza Weibull clasică

Tabel 3.4

Nr. crt.	t (ore de funcționare)	Valoare R(t)	Fiabilitatea echipamentului
1	24	0,997	99 %
2	48	0,993	99 %
3	168	0,976	97 %
4	720	0,900	90 %
5	4.000	0,558	55 %
6	8.000	0,312	31 %

3.3 Variații ale parametrului de formă, β , utilizând legea Weibull

Luând în calcul parametrul de formă, β , se pot trasa graficele în anumite etape de viață ale echipamentului studiat.

Valori ale parametrului de formă, β

Tabel 3.5

Valori ale lui β	Etapa de viață a echipamentului studiat	Valoare test
$\beta < 1$	Etapa infantilă (defecte precoce)	0,85
$\beta = 1$	Etapa vieții utile (defecte accidentale)	1
$\beta > 1$	Etapa uzurii (defecte accidentale și uzură)	2
$\beta > 1$	Etapa uzurii (defecte accidentale și uzură)	3,5

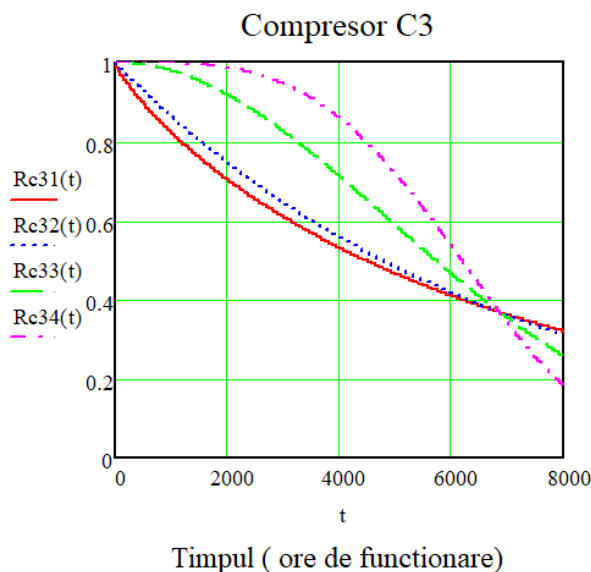


Fig. 3.7 Fiabilitatea compresorului C3 în funcție de etapa de viață [imagine autor]

unde: Rc31- valorile funcției $R(t)$ atunci când $\beta = 0,85$; Rc32- valorile funcției $R(t)$ atunci când $\beta = 1$; Rc33- valorile funcției $R(t)$ atunci când $\beta = 2$; Rc34- valorile funcției $R(t)$ atunci când $\beta = 3,5$.

3.4 Legea propusă de autor

Având în vedere legea de tip Weibull, propusă de către autor, aceasta va include cei trei parametri suplimentari, după cum urmează:

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t}{\theta}\right)^\beta} \cdot e^{-(\omega-1)} \cdot e^{-(v-1)} \cdot e^{-tt} \quad (3.8)$$

iar prin aplicarea valorilor normale ale parametrilor suplimentari din tabelul 3.6 rezultă următorul grafic:

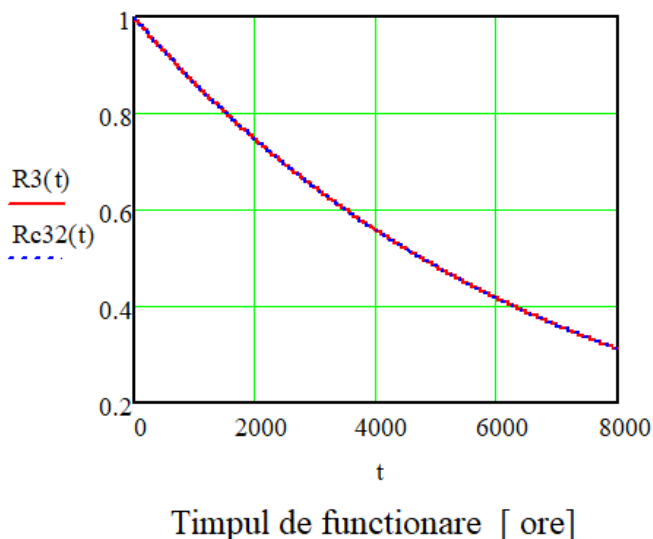


Fig. 3.8 Suprapunerea curbelor trasate cu legea clasică și cu cea propusă de autor cu parametri suplimentari, în condițiile operării cu valorile normale [imagine autor] unde: Rc32(t) este fiabilitatea utilizând legea autorului cu valorile normale din tabelul 3.6, cu o valoare a lui $\beta = 1$; R3(t) este fiabilitatea utilizând legea Weibull clasică.

Alegerea parametrilor suplimentari din noua lege propusă de către autor a fost efectuată astfel încât la un regim normal de funcționare, cele două legi (Weibull și autor) să fie aproape identice. Formulele de calcul pentru cei trei parametri propuși, " ω ", " v " și " tt " au fost alese în funcție de influența și importanța acestora în funcționarea instalației.

Valori ale parametrilor suplimentari propuși de către autor

Tabel 3.6

Parametri propuși de autor	Valoare minimă	Valoare normală*	Valoare maximă (limite oprire compresor)
ω	0,70	0,85	1,20
v	0,20	0,55	1,57
tt	0,18	0,63	1,18

*Notă: Valorile normale au reieșit din media parametrilor de funcționare măsurați în decursul activităților de mentenanță ale autorului.

În modelare, a fost introdusă o medie a timpului de bună de funcționare, $\theta = 8.000$ ore, intervalul de măsură, $t = 10.000$ ore, iar legea propusă de autor să indice fiabilitatea echipamentului la diferite ore de funcționare, variind parametri suplimentari ce privesc încărcarea, vibrațiile și temperatura compresorului. Parametrul de formă, β , va lua valoarea 1.

Fiabilitatea echipamentului variind nivelul de încărcare

Tabel 3.7

Legea de repartiție	Interval de efectuare a reviziilor				
	720 ore (1 lună)	4.000 ore (6 luni)	8.000 ore (12 luni)	16.000 ore (2 ani)	32.000 ore (4 ani)
R(t) Weibull	0,914	0,607	0,368	0,135	0,018
R(t) autor <i>încărcare minimă</i>	1,03	0,687	0,415	0,153	0,021
R(t) autor <i>încărcare normală</i>	0,887	0,589	0,357	0,131	0,018
R(t) autor <i>încărcare maximă</i>	0,625	0,415	0,252	0,093	0,013

Fiabilitatea echipamentului variind nivelul vibrațiilor

Tabel 3.8

Legea de repartiție	Interval de efectuare a reviziilor				
	720 ore (1 lună)	4.000 ore (6 luni)	8.000 ore (12 luni)	16.000 ore (2 ani)	32.000 ore (4 ani)
R(t) Weibull	0,914	0,607	0,368	0,135	0,018
R(t) autor <i>vibrații minime</i>	1,259	0,835	0,507	0,186	0,025
R(t) autor <i>vibrații normale</i>	0,887	0,589	0,357	0,131	0,018
R(t) autor <i>vibrații maxime</i>	0,32	0,212	0,129	0,047	0,006

Fiabilitatea echipamentului variind temperatura de refulare a gazelor

Tabel 3.9

	Interval de efectuare a reviziilor				
Legea de repartiție	720 ore (1 lună)	4.000 ore (6 luni)	8.000 ore (12 luni)	16.000 ore (2 ani)	32.000 ore (4 ani)
R(t) Weibull	0,914	0,607	0,368	0,135	0,018
R(t) autor <i>temperatură minimă</i>	1,391	0,923	0,56	0,206	0,028
R(t) autor <i>temperatură normală</i>	0,887	0,589	0,357	0,131	0,018
R(t) autor <i>temperatură maximă</i>	0,512	0,34	0,206	0,076	0,01

3.5 Valori minime și maxime ale fiabilității compresoarelor

În urma introducerii valorilor normale pentru parametri suplimentari și a studierii suprapunerii cu legea clasică, a reieșit următoarea formulă:

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t}{\theta}\right)^{\beta}} \cdot e^{-(\omega-1)} \cdot e^{-(v-1)} \cdot e^{-tt} \quad (3.9)$$

Fiabilitatea compresoarelor în următoarele ore de funcționare

Tabel 3.10

Valori vibrații	24 ore		48 ore		168 ore		720 ore	
C1- 4,5 mm/ s	0,604	60 %	0,589	58 %	0,521	52 %	0,297	29 %
C1- 7,1 mm/ s	0,341	34 %	0,333	33 %	0,295	29 %	0,168	16 %
C2- 4,5 mm/ s	0,615	61 %	0,611	61 %	0,594	59 %	0,518	51 %
C2- 7,1 mm/ s	0,348	34 %	0,346	34 %	0,336	33 %	0,293	29 %
C3- 4,5 mm/ s	0,617	61 %	0,614	61 %	0,604	60 %	0,557	55 %
C3- 7,1 mm/ s	0,349	34 %	0,347	34 %	0,341	34 %	0,315	31 %

4. Cercetări experimentale în funcționarea compresoarelor

Scopul cercetărilor experimentale a fost de a valida modelul aplicat în simulările efectuate în capitolul 3, în cadrul unei aplicații reale, cu parametri măsurați înainte de căderea echipamentului. Nu în ultimul rând, a fost urmărit ca erorile față de legea propusă de autor să fie cât mai mici, și mult mai apropiate de realitate, comparativ cu legea Weibull clasică.

4.1 Experimentări compresor C3

Evoluția fiabilității compresorului C3 implică analiza mai multor parametri cheie, la fel ca în cazul compresoarelor C1 și C2, măsurate pentru diverse defecțiuni apărute în timpul funcționării.

Defecțiuni ale compresorului C3

Tabel 4.1

	Defecțiunea 1	Defecțiunea 2	Defecțiunea 3	Defecțiunea 4	Defecțiunea 5
M.T.B.F. (θ)	6.864 ore				
Ore la cădere	5.760	4.032	3.288	9.674	11.616
Încărcare	82 %	84 %	80 %	77 %	70 %
Nivel vibrații	2,8 mm/ s	2,9 mm/ s	3,0 mm/ s	3,1 mm/ s	3,4 mm/ s
Temperatura	75 °C	77 °C	78 °C	81 °C	79 °C

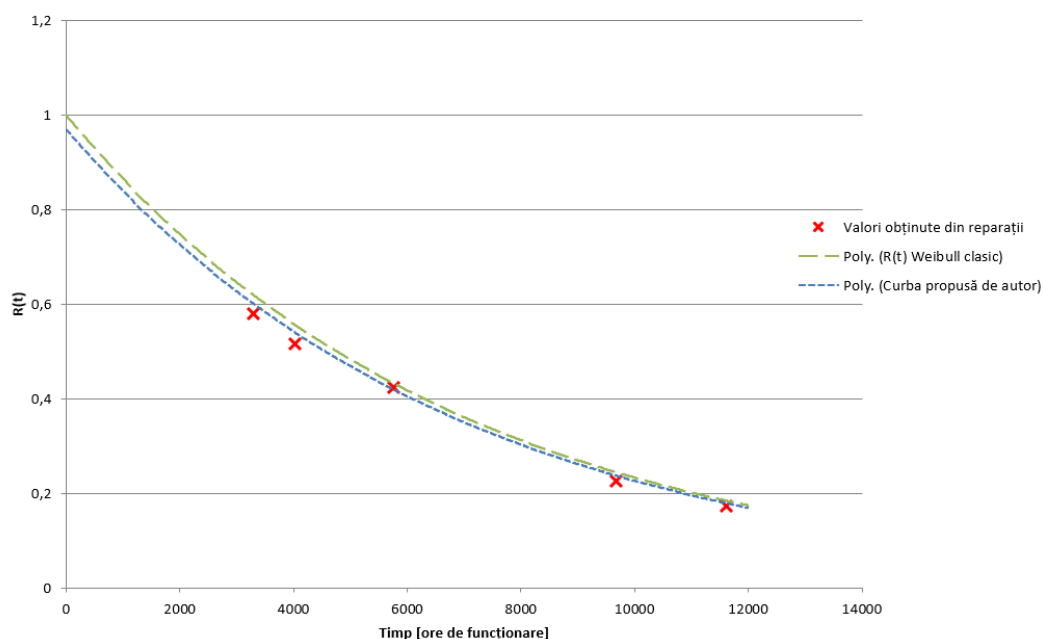


Fig. 4.1 Valori experimentale obținute prin monitorizarea compresorului C3;
Comparație între Legea Weibull clasică și cea propusă de autor [imagine autor]

Comentariu: Se observă că punctele marcate cu X roșu sunt mult mai apropiate de curba propusă de autor în comparație cu legea Weibull. Curba propusă de autor include ajustări și factori specifici care nu sunt luați în considerare în modelul clasic Weibull. Aceste ajustări pot arăta mai bine comportamentul real al compresorului C3.

Erori obținute în calculul fiabilității compresorului C3

Tabel 4.2

Analiză comparativă/ erori	Eroarea defect 1	Eroarea defect 2	Eroarea defect 3	Eroarea defect 4	Eroarea defect 5
Formula teoretică propusă de autor versus rezultatele obținute	1,1 %	4,6 %	3,6 %	5,1 %	3,3 %
Formula clasică de tip Weibull versus rezultatele obținute	1,9 %	7,4 %	6,4 %	7,9 %	6,1 %

Comentariu: Formula teoretică propusă de autor este mai precisă, având erori mai mici în comparație cu legea clasică Weibull pentru toate defectele analizate. Acest lucru sugerează că, formula teoretică ar putea oferi o estimare mai bună a fiabilității compresorului C3. Legea propusă de autor se dovedește a fi mai precisă, cu diferențe semnificative între erori, variind între 0,8% și 2,8%, indicând o precizie mai bună în estimarea fiabilității pentru toate defectele analizate.

5. Concluzii generale

Lucrarea își propune să aducă un aport suplimentar în vederea calculului fiabilității instalațiilor de comprimare gaze naturale, echipate cu compresoare cu șurub. Comparativ cu instrumentele clasice, lucrarea propune o îmbunătățire a legii de tip Weibull, prin introducerea de noi parametri ce sunt strâns legați de nivelul de vibrații al ansamblului de comprimare (cu precădere motor electric principal și compresor cu șurub) și nivelul termic la care lucrează aceste echipamente.

Astfel că, experiența autorului acumulată în decurs de peste 12 ani în domeniul mentenanței compresoarelor cu șurub și aplicarea noii legi de tip Weibull, pot fi aplicate în calculul de fiabilitate al acestor tipuri de echipamente.

Legea propusă de autor, cu ajutorul modelărilor și simulărilor efectuate în decursul lucrării, au generat rezultate concludente, care sunt aplicabile în practică și sunt de un real interes pentru creșterea fiabilității ansamblurilor de comprimare gaze naturale din industrie.

6. Contribuții originale ale autorului

Teza de doctorat abordează un subiect de nouă actualitate pentru producătorii de echipamente de comprimare, îndeosebi pentru Institutul Național de Cercetare-Dezvoltare Turbomotoare COMOTI. Subiectul tezei a fost impus de o necesitate a producătorului de a dispune de un studiu de fiabilitate operațională a compresorului cu șurub.

Autorul tezei a avut următoarele contribuții originale în prezenta lucrare:

1. A fost prezentat un studiu complex asupra problemelor de fiabilitate cu analiza legilor de repartiție a defectelor, care este deosebit de util pentru studiul mentenanței;
2. Se propune o lege nouă de repartiție a defectelor, de tip Weibull, completată cu factori care iau în considerație: nivelul de încărcare, nivelul de vibrații și temperatura. Noua lege propusă de autor permite stabilirea fiabilității compresorului cu șurub;
3. Autorul stabilește prin experimentări, valorile coeficienților introduși în legea de repartiție originală, valori deosebit de utile pentru calculul fiabilității.
4. Legea propusă de autor cuprinde o serie de elemente, nivel încărcare, nivel vibrații și temperaturi, deosebit de importante în funcționarea electrocompresorului cu șurub, ceea ce în alte relații de repartiție nu se regăsesc.

7. Direcții de cercetare în viitor

Parametrii suplimentari utilizați în prezenta aplicare a legii Weibull pot fi cu indici ce țin de procesul tehnologic al echipamentului studiat. În acest caz, pot fi adăugați parametri ce pot fi influențați de calitatea uleiului din instalația de ungere, un exemplu ce a fost des semnalat în operarea acestor echipamente, fapt ce a determinat și un număr mare de căderi.

Introducerea unei noi metode poate aduce îmbunătățiri semnificative în domeniul fiabilității și poate deschide noi perspective pentru cercetare și dezvoltare.

Lista lucrărilor publicate și activitate profesională

- [1] **Robert Isac**, Teodor Stănescu, Valentin Petrescu- Infrared termography- Extending operating life of natural gas compression equipment with screw compressor units, CIEM 2023
- [2] Teodor Stănescu, Valentin Petrescu, **Robert Isac**, Elena Presură- Chirilescu, Daniel Ușeriu, Gabriel Badea- Performance analysis of centrifugal blowers with inlet guide vane control under different inlet conditions- CIEM 2023
- [3] **Robert Isac**, Daniel Crunțeanu „Investigation of low emission combustors using hydrogen lean direct injection”, Incas Bulletin, Volume 3, București, 09/2011;
- [4] Robert Isac, Florin Frunzulică, Daniel Crunțeanu, "Aerodynamic study of active flow control using blowing jets over some trailing edge configurations", ICNAAM 2014
- [5] Iulian Vladucă, **Robert Andrei Isac**, Vicențiu Liviu Ringheanu, Emilian Toma, Carmen Petre, Ramona- Manuela Stanciuc, Daniela Constantin, Mirela- Letiția Vasile- Reliability and maintenance of motor operated valves, in the romanian natural gas compression and distribution stations- Technium Vol. 21, 2024
- [6] Valentin Petrescu, Teodor Stănescu, Eduard Vasile, **Robert Isac**, Daniel Lale- Theoretical and experimental research om the pressure variation in the compression chamber of the oil injected screw compressor- UPB Sci. Bull., Series D, Vol. 85, Iss 4, 2023
- [7] Alexandru Tudorache, **Robert Isac**, Emilian Toma- "Optimising low speed dynamic balancing of high speed rotors"- Turbo Scientific Journal, vol. IV, nr. 1/ 2017.
- [8] **Robert Isac**- Responsabil de contract- “Cercetări privind diagnoza și predicția timpului de bună funcționare la turbomașini”- Nucleu 11N/2016/ cod PN 16.26.03
- [9] **Robert Isac**- Responsabil de contract- “Cercetări fundamentale în domeniul monitorizării și diagnozei în timp real pentru mentenanța predictivă la mașini rotative utilizate în aplicații aerospațiale și navale, folosind simulări Hardware-in-the-Loop, semnale de vibrații și acustice”- Nucleu 31N, PN 23.12.08.01
- [10] **Robert Isac**- Responsabil de contract MN 013.P- Isac- MND Cehia reparație compresoare cu șurub de tip CU64GM;
- [11] **Robert Isac**- Responsabil de contract- Expert Petroleum Solutions- Mentenanță și întreținere compresoare cu șurub de tipul CF246- zona Țicleni; 2014- prezent;

- [12] **Robert Isac** Activități de ofertare tehnico- financiare pentru reparații compresoare OMV- Petrom, Mazarine Energy, Dacian Petroleum, Petrofac și Expert Petroleum;
- [13] **Robert Isac**- Activități de mentenanță și întreținere la electrocompresoare cu șurub Contract 99008802 ECS și 99008642- 2012÷2025; Reparații și punere în funcțiune;
- [14] **Robert Isac** Activități de ofertare tehnico- financiare pentru reparații turbosuflante ALCO TS 165 (TS5) și TS131(TS6);
- [15] **Robert Isac**- Activități de ofertare tehnico- financiare pentru reparații turbosuflante HV- Turbo; Reparații și punere în funcțiune;
- [16] **Robert Isac** - Activități de ofertare tehnico- financiare pentru reparații suflante cu lobi- AERZEN GM 7, GM11 și GM35; Reparații și punere în funcțiune;
- [17] **Robert Isac**- Activități de montaj, mentenanță și operare privind echipamente tehnice și instalații din spații industriale cu pericol de atmosfere explozive, INSEMEX.

Bibliografie

1. **Osarenren, John.** *Integrated Reliability: Condition Monitoring and Maintenance of Equipment 1st Edition.* s.l. : CRC Press, 2015.
2. **Robert Perez, Julien LeBleu Jr.** *Operator'S Guide to Rotating Equipment: An Introduction to Rotating Equipment Construction, Operating Principles, Troubleshooting, and Best Practices.* s.l. : Author House, 2014.
3. **COMOTI, Institutul Național de Cercetare- Dezvoltare Turbomotoare.** Arhivă. București : s.n., 2024.
4. **Klaus Brun, Rainer Kurz.** *Compression Machinery for Oil and Gas.* s.l. : Elsevier Science, 2018.
5. **Eugeniu Datcu, Ioana Armas.** *Fiabilitatea sistemelor mecatronice.* s.l. : Editura Hyperion XXI, 1998.
6. **Gabriel Burlacu, Nicolae Danet, Costica Bandrabur, Tache Duminica.** *Fiabilitatea, mentenabilitatea și disponibilitatea sistemelor tehnice.*
7. **Davidson, John.** *The Reliability of Mechanical Systems.* s.l. : Wiley, 1994.
8. **Straub, Daniel.** *Reliability and Optimization of Structural Systems.* s.l. : CRC Press, 2010.
9. **Kenneth C. Latino, Mark A. Latino, Robert J. Latino.** *The PROACT® Root Cause Analysis.* s.l. : CRC Press, 2020.
10. **Yi Ren, Cheng Qian , Dezhen Yang , Qiang Feng , Bo Sun , Zili Wang.** *Model-Based Reliability Systems Engineering.* s.l. : Springer, 2024.
11. **Dilbagh Panchal, Mangey Ram, Prasenjit Chatterjee, Anish Kumar Sachdeva.** *Industrial Reliability and Safety Engineering: Applications and Practices.* s.l. : CRC Press, 2023.
12. **J. Flamm, T. Luisi.** *Reliability data collection and analysis.* s.l. : Hardcover, 1992.