

ANALIZA DEFECTELOR MOTOARELOR ASINCRONE DE TRACȚIUNE TIP MTA2 PENTRU LOCOMOTIVE ELECTRICE

Radu Zlatian¹, Ion Costea²

¹Academia de Științe Tehnice din România

²Softronic Craiova, România

radu.zlatian@sincos.eu¹, ion.costea@softronic.ro²

Rezumat. În prezenta lucrare, se prezintă rezultatele studiului realizat pentru identificarea defectelor motoarelor electrice de tracțiune tip MTA2 proiectate și fabricate de compania Softronic pentru locomotivele electrice LEMA 6000 kW.

Motoarele electrice asincrone de tracțiune asigură o bună fiabilitate în condițiile prescrise de proiectant pentru exploatare și întreținere. Cu toate acestea, o serie de factori sollicitanți cauzează degradarea și îmbătrânirea, fapt care determină o analiză atentă a modurilor de defectare, cauzele și măsurile ce se pot lua pentru reducerea frecvenței și consecințelor posibilelor defecte. Istoricul de funcționare a acestor motoare în serviciul de tracțiune permite analiza informațiilor relevante din exploatare, dar și analiza etapelor de fabricație, montaj și exploatare. Studiul abordează problematica propusă utilizând FTA (Failure Tree Analysis) și Failure Modes and Effects Analysis (FMEA) și ia în considerare analiza defectelor posibile, modul lor de producere, cauzele, detecția și măsurile ce pot fi luate pentru creșterea fiabilității și disponibilității.

1. INTRODUCERE

Datorită unor situații extreme în care motoarele de tracțiune nu mai pot asigura mișcarea locomotivele pot fi imobilizate pe calea ferată perturbând traficul. Pentru exploatarea feroviară această situație este considerată un eveniment major care generează daune materiale deosebit de importante. Ca urmare, întreg sistemul de tracțiune al unei locomotive are siguranță critică, iar motoarele de tracțiune fac parte din acest sistem. În prezent, pentru obținerea celei mai bune disponibilități, producătorii de locomotive și trenuri multiunit utilizează motoare de tracțiune asincrone cunoscute pentru robustețea și fiabilitatea lor.

Chiar dacă, în principiu, aceste motoare sunt fiabile proiectarea, producția, exploatarea și întreținerea pot face ca fiabilitatea lor să devină precară. Pentru preîntâmpinarea acestor situații este obligatorie identificarea și analiza situațiilor care pot afecta fiabilitatea. Analiza comportă identificarea cauzelor defectelor posibile, analiza impactului pe care-l au și elaborarea unui tratament care să ducă la minimizarea frecvenței și efectului consecințelor până la un nivel acceptat ca tolerabil.

Cele mai potrivite metode pentru analiza defectelor motoarelor electrice de tracțiune sunt analiza modului de defectare și a efectului defectelor (Failure Mode and Effect Analysis - FMEA) și Analiza arborelui defectelor (Failure Tree Analysis - FTA). Articolul prezintă aplicarea acestor metode și rezultatele obținute pentru asigurarea că motorului de tracțiune

MTA2 poate fi încadrat în categoria produselor cu fiabilitate ridicată care asigură disponibilitatea și siguranța cerută în exploatare.

2. MOTORUL MTA2

Motorul electric de tracțiune MTA2 fabricat de Softronic este un motor asincron cu rotor în scurtcircuit cu șase poli care echipează locomotivele LEMA 6000 kW fabricate de aceeași companie. Tracțiunea unei locomotive este asigurată de șase motoare, câte trei pe fiecare boghiu.

Tabelul 1
Principalele caracteristici la motorului MTA 2

Caracteristici	UM	Valori		
		Operare continuă	Regim uniorar	Maxim
Putere	kW	1000	1100	-
Tensiune	V	1200	1200	-
Curent	A	575	632	-
Turație	rpm	1089	1089	2500
Frecvență	Hz	55	55	125
Cuplu	Nm	8778	9656	-

Motorul este o construcție cu două lagăre pe rulmenți și ax tubular (Fig.1). Mișcarea de rotație a axului tubular se transmite reductorului care antrenează roțile locomotivei printr-un mecanism cu rol de amortizare a vibrațiilor și șocurilor provenite de la contactul roată-șină. Prin axul tubular al motorului trece un arbore de torsiune (6). Legătura dintre axul tubular și arborele de torsiune se realizează printr-un cuplaj dințat (7, 8) care asigură un grad de libertate în spațiul tridimensional.

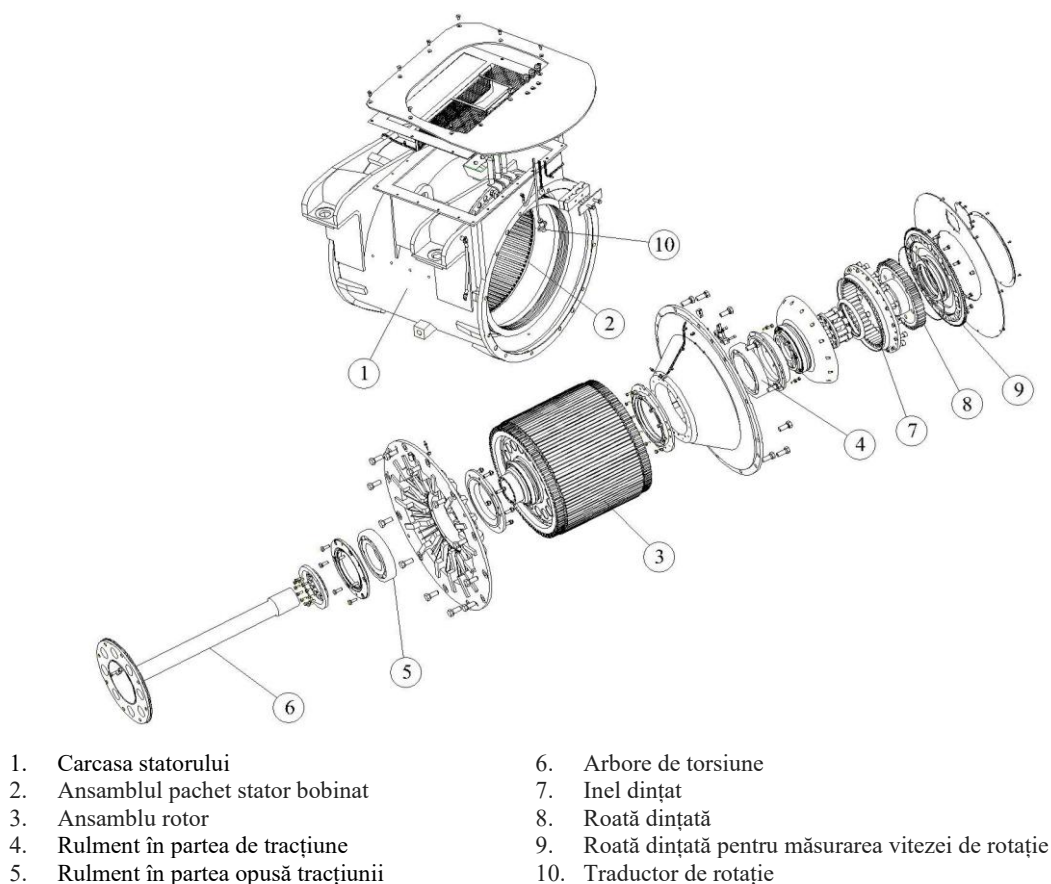


Fig.1 – Motorul MTA 2.

Mai mult, pentru atenuarea șocurilor unghiulare mișcarea se transmite de la arborele de torsiune la reductor printr-un cuplaj cu bușii de cauciuc. În final, datorită mecanismului format din inel cu dinți interiori – roată dințată, arborele elastic de torsiune, cuplajul cu bușii de cauciuc, neuniformitățile contactului roată-cale ferată sunt transmise arborelui motor sub forma unor vibrații acceptabile pentru integritatea sa mecanică.

Deoarece mediul în care funcționează acest motor este unul sever, sistemul de izolare ales este clasa H de temperatură cu absorbție minimă de apă. Răcirea (Fig. 2) este asigurată de un curent de aer cu debitul de $1,8\text{m}^3/\text{sec}$ și o presiune de $250\text{ mm H}_2\text{O}$. Oprirea sistemului de ventilare aduce după sine întreruperea alimentării cu energie electrică a motorului.

Motorul este fixat pe rama boghiului utilizând elemente de amortizare a șocurilor mecanice. Acționarea roților monobloc cu osia (Fig.3) se realizează prin intermediul unui reductor cu roți dințate cu profil special.

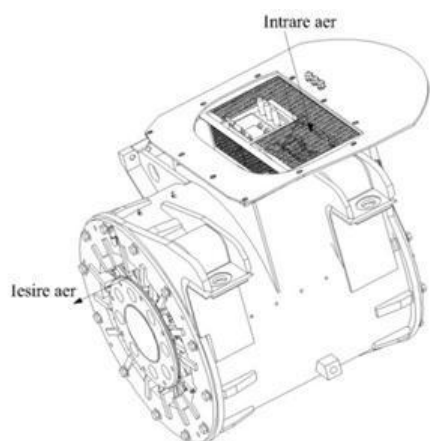


Fig. 2 – Motorul MTA 2 – răcirea.

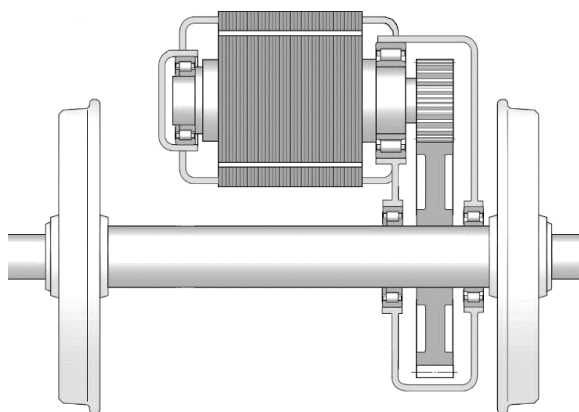


Fig. 3 – Ansamblul sistemului de tracțiune.

3. FIABILITATEA MOTOARELOR MTA2

3.1 Considerații generale specifice motoarelor asincrone

La fel ca multe dispozitive electrice, mecanice, electromecanice sau de altă natură, motoarele electrice au o durată de viață marcată de trei perioade caracteristice: de copilărie, de maturitate, operare sau utilizare și de declin sau îmbătrânire. Graficul duratei de viață (Fig.4) reprezintă evoluția în timp a ratei de defectare și se aseamănă cu o secțiune printr-o cadă de baie. Imediat după punerea în funcțiune numărul de defecte poate fi mare, dar scade foarte repede, apoi urmează o perioadă lungă în care numărul de defecte este relativ constant, după care devine din ce în ce mai mare ducând inevitabil la eliminare și înlocuire.

Cele mai multe defecte ale motoarelor electrice se datoresc unor solicitări care, de cele mai multe ori, acționează în combinație. În proiectare sunt luate în considerare anumite valori ale solicitărilor, dar cumulara în timp a efectului acestora, la fel ca și apariția aleatoare a unor solicitări mai mari decât cele nominale pot determina apariția unor defecte.

În perioada prematură sau infantilă rata defectelor este mare și descrește odată cu trecerea timpului, în timp ce numărul cumulat de defecte crește în ritm rapid. Cele mai multe dintre defecte sunt sistematice și se pot datora greșelilor de proiectare, utilizării de materiale neconforme, proceselor de fabricație, controlului superficial sau insuficient al calității în timpul și după fabricație, etc.

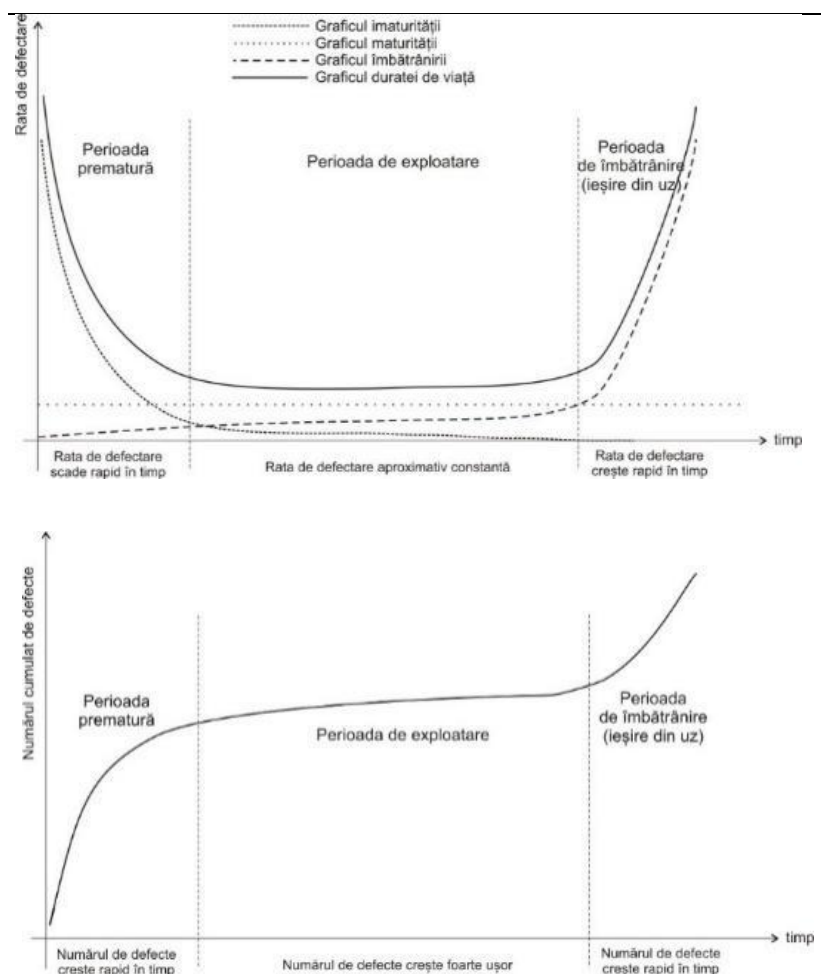


Fig.4 – Graficul duratei de viață graficul defectelor cumulate.

În timpul *perioadei de exploatare* sau *de utilizare* rata eșecurilor are o valoare relativ mică și aproximativ constantă. În această perioadă defectele au caracter aleator, datorându-se unor vulnerabilități ale calității materialelor, tehnologiilor de fabricație, exploatarea și întreținerea neconforme. Perioada ar trebui să aibă o durată cât mai mare, iar evenimentele de eșec și durata lor ar trebui să poată fi previzionate. Experimental, s-a stabilit că în această perioadă motoarele electrice asincrone au o rată a defectelor relativ constantă.

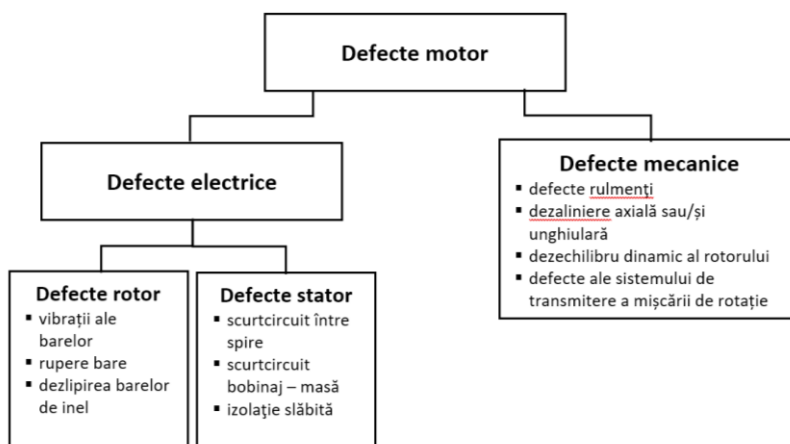
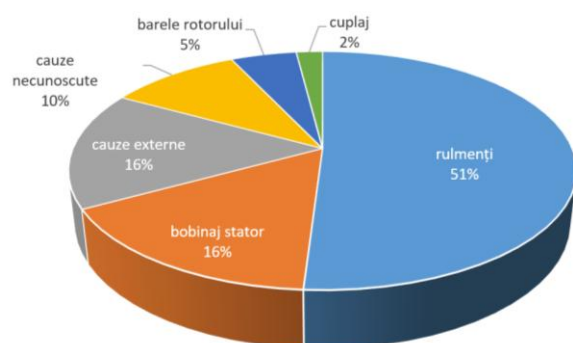


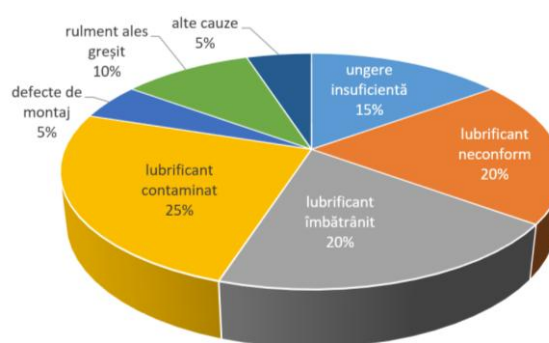
Fig.5 – Defectele motoarelor electrice.

Exceptând eventualele deficiențe de fabricație, principalele solicitări pot fi:

- a) în rulmenți:
 - termice (supraîncălzirea, calitatea, contaminarea și îmbătrânirea lubrifiantului)
 - încărcare dinamică și statică (radială și/sau axială datorită dezalinierei axiale și/sau unghiulare a rotorului)
 - vibrații și șocuri (dezechilibru și/sau dezaliniere rotor, jocuri excesive ale mecanismul de transmitere a mișcării de rotație)
 - mediu (condiții excesive de mediu, contaminare cu substanțe chimice agresive)
 - curenții electrici (sarcini electrostatice, curenți prin rulmenți)
- b) în stator:
 - termice (temperatură ridicată)
 - electrice (supratensiuni, supracurenți, fenomene tranzitorii la pornire/oprire)
 - mecanice (vibrații, șocuri, corpuri străine)
 - de mediu (condiții excesive de mediu, substanțe active chimic)
 - de izolație electrică (scăderea rezistenței de izolație, străpungerea izolației)
- c) în rotor
 - termice (temperatură ridicată)
 - mecanice (dezechilibru dinamic, dezaliniere axială și/sau unghiulară, vibrații ale barelor, ruperea sudurilor bare-inele de scurtcircuit)
- d) sistemul de transmitere a mișcării de rotație
 - îmbătrânirea și oboseala materialelor
 - suprasarcini mecanice (vibrații, șocuri, cuplu, dezaliniere, dezechilibru)
 - mediu agresiv (coroziune, umiditate, eroziune, uzură, cavitație, temperaturi ridicate)
- e) calitatea tensiunii de alimentare
 - tranzițiile de tensiune
 - dezechilibrul tensiunilor
 - distorsiunile mecanice



a) ponderea cauzelor de defect la motoarele electrice



b) ponderea cauzelor de defect la rulmenții motoarelor electrice

Fig.6 – Cauze ale defectelor.

după *Root Cause Failure Analysis for AC Induction Motors in the Petroleum and Chemical Industry*, autori A. H. Bonnett, G. Missouri (Copyright Material IEEE, Paper No. PCIC-2010-43)

Prin identificarea naturii și a originii factorilor de solicitare (Tabel nr. 2), este posibil să se găsească cele mai potrivite metode pentru diminuarea efectelor acestora. În acest sens, pot fi adecvate practicile bune de exploatare și întreținere, monitorizarea permanentă și activități

periodice de testare. Unii factori de solicitare, cum este căldura generată de pierderile electrice și mecanice, nu pot fi niciodată eliminați, au efecte previzibile care pot fi atenuate prin măsuri adoptate încă din faza de proiectare. Alți factori de solicitare generează efecte ce pot fi atenuate printr-o întreținere preventivă executată conform prescripțiilor proiectantului.

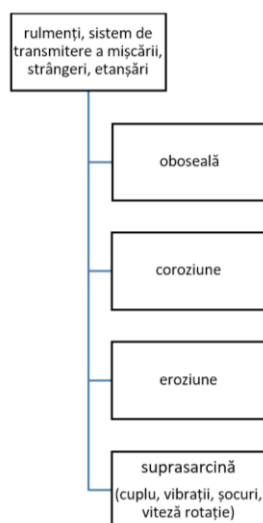


Fig.7. Cauze posibile ale unor defecte mecanice

(defecte fizice ale materialelor pot apare datorită unei dintre cauzele enumerate sau a oricărei combinații între ele)

Tabelul 2.

Categorie	Originea solicitărilor	Tipuri de solicitări						
		v i b r a ți i	c i c l u r i m e c a n i c e	o b i c e t r ă i n e	c i c u l i e l c t r i c e	î n c ă l z i r e	u m i d a r i d e a p ă	s u b s t a n ț e c h i m i c e
Operațional la nivel de componente	încălzire prin efect Joule					X		
	frecare	X	X			X		
	dezechilibru mecanic	X	X			X		
	suprasarcini mecanice	X	X			X		
Operațional la nivel de sistem	supratensiuni		X		X	X		
	dezechilibrul tensiunilor de fază	X	X		X	X		
	tranziții electrice	X	X		X	X		
	sistemul de ungere	X	X		X	X		

Mediu	sistemul de răcire					X		X
	condiții ambiante					X	X	X
	vibrații	X	X					
	întreținerea deficitară a ungerii	X	X	X	X	X		X
Factori umani	întreținerea deficitară a răcirii			X		X		
	testare superficială sau insuficientă	X		X	X	X		
	defecte de fabricație	X		X	X	X		X

Perioada de îmbătrânire sau ieșire din uz este ultima perioadă de viață și se caracterizează printr-o trecere accelerată de la o rată a defectelor mică și relativ constantă la o rată rapid crescătoare și, implicit la un număr cumulat de defecte din ce în ce mai mare. Această etapă se sfârșește cu decesul motorului. După ce și-au îndeplinit funcțiunile o perioadă îndelungată, uzual de ordinul zecilor de ani, motoarele deja obosite datorită îmbătrânirii se supun unor reparații generale sau, cel mai adesea se înlocuiesc cu unele noi, cu performanțe superioare date de evoluția în timp a concepției, materialelor și tehnologiei de fabricație.

3.2 Analiza FMEA

Pentru a înțelege relațiile dintre factorii de solicitare și motorul de tracțiune se analizează tipurile de defecte specifice motoarelor MTA2. Această analiză se realizează prin metoda FMEA (Failure Mode Effect Analysis).

FMEA este o metodă specifică studiului fiabilității prin care se documentează defectele posibile rezultate din proiectarea, fabricația sau întreținerea unui sistem. Prin analiza modului de defectare și a efectului fiecărei defecțiuni asupra funcționării sistemului se identifică punctele de insuficiență unică care sunt esențiale pentru succesul funcționării în limitele cerințelor stabilite înainte de proiectare. Utilizând FMEA se identifică și se prioritizează posibilele moduri potențiale de defectare, efectele potențiale ale defectelor, cauzele potențiale ale defecțiunilor (ex: proiectare, materiale, fabricație, întreținere etc), metode de detecție a iminenței apariției defectelor, măsuri ce se pot lua pentru atenuarea riscului apariției defectelor și se determină un factor de severitate a riscului.

În cazul motoarelor MTA2, FMEA (Tabelul 3) oferă modul în care fiecare componentă se poate defecta, mecanismele care determină apariția defectului și cum acesta poate afecta performanțele generale. În același timp, pentru fiecare defect se stabilește metoda și mijloacele prin care se identifică mecanismul/ele de defectare împreună cu metoda/ele de atenuare a efectelor acestor mecanisme. Cunoscând toate aceste informații se poate determina criteriul de eșec al oricărei componente motorului și modul de exploatare și de întreținere preventivă. Scopul final este stabilirea unei anumite conduite privitoare la activitățile de inspecție, supraveghere, întreținere și de alocare a resurselor necesare acestor operațiuni.

Originea defectelor se află în tipurile de solicitări specifice acestui motor, iar acestea se pot împărți în solicitări datorate mediului (temperatură, umiditate, agenți corozivi, pătrunderea unor corpuri străine), solicitări datorate condițiilor de alimentare (calitatea tensiunii, dezechilibrul fazelor, lipsa unei faze) și solicitări de exploatare (regimuri mecanice și electromagnetice tranzitorii datorită pornirilor/opririlor, sarcinilor excesive, ventilație insuficientă). Desigur, datorită multiplilor factori cauzali care concură la apariția unui defect, efectele pot fi diferite. De exemplu, un defect de proiectare a izolației poate avea ca efect scurtcircuitul unei bobine la masă, scurtcircuitul între bobine sau scurtcircuit între spirele unei bobine.

Fiecare componentă majoră a motorului a fost analizată (Tabelul 3) individual pentru a determina cele mai importante moduri de defectare, mecanismele de defectare, efectul potențial al eșecurilor, metodele de detectare a eșecurilor și unele metode sau tehnici care ar putea fi utilizate pentru atenuarea efectelor.

Informațiile obținute din această analiză au fost utilizate pentru modificarea proiectului de introducere în fabricație constând în utilizarea de materiale cu proprietăți adecvate și îmbunătățirea tehnologiei de fabricație pentru obținerea unei rate de defectare foarte mică. Totodată s-a stabilit conduita de întreținere preventivă astfel încât disponibilitatea să fie continuă între două revizii consecutive efectuate pentru fiecare locomotivă la cca. 500.000 km parcurși.

FMEA relevă clar modul de defectare, mecanismul de defectare, efectul fiecărui defect, metodele de detecție, măsurile care se pot lua pentru atenuarea efectelor fiecărui defect și gradul severității posibilelor consecințe. Luând ca informație primară gradul severității consecințelor și măsurile prin care efectele defectelor sunt atenuate s-au elaborat corecții ale proiectului tehnologic și ale manualului de întreținere preventivă.

Tabel nr.3

Nr.	Subans.	Modul de defectare	Mecanism de defectare	Efectul defectului	Metode de detecție	Atenuarea efectului	Seve-ritate
1	Bobinaj stator	1.1. Scurtcircuit la masă	Degradarea izolației generată de: a) efecte termice cauzate de: temperaturi ridicate, deficit de ventilare b) sub/ supratensiuni, dezechilibrul tensiunilor de alimentare, acțiuni electrice ale fenomene tranzitorii, impulsuri de tensiune c) suprasarcini mecanice, acțiuni mecanice datorită vibrațiilor și/sau frecărilor, slăbirii strângerilor d) obiecte străine introduse prin sistemul de ventilare e) acțiunea mediului (umiditate, agenți chimici, suspensii <u>micronice</u> de materiale organice sau neorganice) f) îmbătrânirea izolației g) defecte de fabricație	a) distrugerea înfășurărilor statorului b) distrugerea izolației (defect ce (nu) poate fi reparat)	a) Inspectia vizuală b) Măsurare: R, RI, PI, DAR, c) Teste: Step test, d) <u>Surge</u> test, <u>Hipot</u> test (ca), PD test	a) întreținerea corectă a sistemului de răcire b) monitorizarea sistemului de răcire (temperatură aer și apă, presiune apă, nivel lichid răcire, debit aer) c) monitorizarea izolației (tendința de evoluție RI, PI) d) monitorizarea temperaturii bobinelor e) îmbunătățirea calității tensiunilor de alimentare	5
		1.2 Scurtcircuit între bobine	La fel ca mai sus	La fel ca mai sus			5
		1.3. Scurtcircuit între spirele unei bobine	La fel ca mai sus	La fel ca mai sus			5
		1.4. Întreruperea unei bobine	a) topirea lipiturilor datorită supraîncălzirii b) vibrații, oboseala indusă de câmpul electromagnetic	La fel ca mai sus			4

Nr.	Motor part	Modul de defectare	Mecanism de defectare	Efectul defectului	Metode de detecție	Atenuarea efectului	Seve-ritate
2	Conexiunile bobinelor statorului, conexiunile bobinelor la cutia de borne	2.1. Scurtcircuitul unei faze la masă	a) suprasarcini mecanice, acțiuni mecanice datorită vibrațiilor și/sau frecărilor, slăbirii strângerilor, obiecte străine b) contaminare cu praf sau particule conductoare c) defecte de fabricație	distrugerea izolației	a) inspecție vizuală b) termografie în infraroșu c) măsurare: R, RI d) <u>Hipot</u> test (ca)	a) întreținere corectă b) inspecție periodică vizuală și termografică c) monitorizarea vibrațiilor d) monitorizarea curenților de fază	5
		2.2 Scurtcircuit între faze	La fel ca modul de defectare de la pct. 1.1.	distrugerea izolației (defect ce poate fi reparat)			5
		2.3. Circuit întrerupt	a) scurtcircuit între bobine b) rupere conductor datorită vibrațiilor mecanice/ electromagnetice c) distrugerii mecanice datorită corpurilor străine, slăbirii strângerilor	a) întreruperea continuității bobinelor b) străpungerea izolației c) supraîncălzire d) scăderea puterii			4
		2.4. slăbirea legăturii conductoarelor la borne	a) slăbirea strângerilor conexiune bobină-bornă datorită vibrațiilor, factori ciclici de oboseală, tranziții electromagnetice b) corpuri străine	a) aleator motorul este alimentat în două sau chiar o fază b) degradarea/ distrugerea izolației conductoarelor bobine-borne c) degradarea/ distrugerea bornelor d) scăderea puterii			5
3	Miezul statorului	3.1. joc între tole	a) slăbirea strângerii prin ruperea sudurilor datorită vibrațiilor mecanice și/sau electromagnetice b) defect de fabricație	a) încălzire b) creșterea curenților c) scăderea puterii	periodic inspecție vizuală și termografie în infraroșu	defecte nereparabile care necesită înlocuirea rotorului	4
		3.2. supraîncălzire	degradarea izolației dintre tole	la fel ca modul de defectare de la pct. 3.1.			4
		4.2. ruperea sist. de fixare în carcasă	a) ruperea bolțurilor de fixare b) ruperea sudurilor c) defect de fabricație	rotirea statorului bobinat în carcasă		controlul calității lucrărilor în timpul fabricației	4

Nr.	Motor part	Modul de defectare	Mecanism de defectare	Efectul defectului	Metode de detecție	Atenuarea efectului	Severitate
4	Bobina în scurtcircuit a rotorului	4.1 ruperea barelor lângă inelul de scurtcircuitare	a) oboseala datorită vibrațiilor mecanice și ciclurilor electromagnetice b) degradarea lipiturilor bară-inel	a) creșterea curenților de fază b) supraîncălzirea c) pierdere de putere d) creșterea vibrațiilor și a zgomotului	a) periodic inspecție vizuală b) măsurarea vibrațiilor c) măsurarea curenților	a) monitorizarea curenților b) monitorizarea vibrațiilor (valorile limită și tendința de evoluție)	4
		4.2. mișcarea barelor în creștătură	a) vibrații b) cicluri electromagnetice c) cicluri ale fenomenelor tranzitorii electrice și mecanice d) cicluri termice e) defecte de fabricație	la fel ca modul de defectare de la pct. 5.1.			4
		4.3. dezlipirea barelor de inelul de scurtcircuitare	a) oboseala datorită vibrațiilor mecanice și electromagnetice b) cicluri ale fenomenelor tranzitorii electrice și mecanice c) temperaturi ridicate d) defecte de fabricație	la fel ca modul de defectare de la pct. 5.1.			
5	Miezul rotorului	5.1 slăbirea izolației de creștătură și a rigidității mecanice a barelor	a) vibrații ale barelor datorită unor defecte de fabricație b) materiale izolatoare neconforme c) defecte de fabricație	a) încălzire b) creșterea curenților de fază c) creșterea vibrațiilor	a) inspecție periodică vizuală și prin termografie în infraroșu b) monitorizarea vibrațiilor	defect reparabil prin refacerea izolației de creștătură și a bobinei tip colivie	3
		5.2. supraîncălzirea miezului	degradarea termică a izolației tolelor	a) încălzire b) creșterea curenților c) scăderea puterii	a) inspecție periodică vizuală b) termografie în infraroșu	a) monitorizarea curenților b) monitorizarea vibrațiilor (defectul este nereparabil și necesită înlocuirea rotorului)	3

Nr.	Motor part	Modul de defectare	Mecanism de defectare	Efectul defectului	Metode de detecție	Atenuarea efectului	Severitate
6	Rulmenți	6.1. îmbătrânirea rolor	a) utilizarea de vaseline nerecomandate de fabricantul rulmenților b) calitate vaselinei c) ungere insuficientă d) contaminarea vaselinei e) temperatură ridicată f) vibrații datorate dezechilibrului sau dezalinierei rotorului g) degradarea datorită curenților de circulație f) terminarea duratei de viață	a) vibrații excesive b) supraîncălzirea vaselinei	a) monitorizarea temperaturii rulmenților b) monitorizarea vibrațiilor c) inspecția vizuală d) analiza vaselinei a) întreținerea sistemului de ungere	a) inspecția periodică, curățarea și schimbarea vaselinei b) monitorizarea tendinței temperaturii și vibrațiilor a) întreținerea sistemului de ungere	5
		6.2. defecte ale elementelor rulmenților	a) distrugerea parțială sau totală a coliviei (rolele se freacă între ele) b) degradarea suprafețelor inelelor de rostogolire c) efecte electrice asupra suprafețelor inelelor de rostogolire d) pierderea etanșării contra evacuării vaselinei	a) vibrații excesive a) zgomot excesiv	a) monitorizarea temperaturii rulmenților b) monitorizarea vibrațiilor b) inspecția vizuală	b) la fel ca modul de defectare de la pct. 6.1.	5
		6.3. defecte ale agentului de ungere (vaselina)	a) pierderea vaselinei b) vaselină insuficientă sau în exces c) vaselină nepotrivită d) deficiențe de calitate ale vaselinei e) contaminarea vaselinei f) temperatură ridicată g) vibrații	a) îmbătrânire b) temperatură ridicată c) dezaliniere sau dezechilibrare d) montarea greșită a rulmenților b) vaselină contaminată (cu praf, apă etc)	la fel ca modul de defectare de la pct. 6.1.	la fel ca modul de defectare de la pct. 6.1	5
		6.4. defecte ale sistemului de ungere	cantitatea de vaselină este insuficientă sau este în exces	a) ungere insuficientă b) ungere în exces cu evacuarea surplusului în motor			

Nr.	Motor part	Modul de defectare	Mecanism de defectare	Efectul defectului	Metode de detecție	Atenuarea efectului	Severitate
7	Ax	7.1. pierderea echilibrării rotorului	a) defecte de fabricație b) vibrații	a) creșterea vibrațiilor b) îmbătrânirea/distrugerea rulmenților	c) inspecție vizuală d) verificarea alinierii e) monitorizarea vibrațiilor f) analiza armonică a vibrațiilor g) monitorizarea temperaturii rulmenților	c) inspecție vizuală periodică d) monitorizarea evoluției vibrațiilor e) monitorizarea evoluției temperaturii	4
		7.2. fisurare	a) material defect b) oboseala materialului c) propagarea fisurii datorită vibrațiilor mecanice și cicurilor mecanice	posibilă creșterea vibrațiilor	a) inspecție vizuală b) monitorizarea vibrațiilor	a) inspecție vizuală și ultrasonică periodică b) monitorizarea evoluției vibrațiilor	4
		7.3. vibrații	a) pierderea alinierii axiale sau unghiulare b) defectarea rulmenților c) pierderea echilibrării rotorului	a) îmbătrânirea excesivă a rulmenților b) distrugerea rulmenților c) atingerea rotorului de stator d) defecte de fabricație	la fel ca modul de defectare de la pct. 7.1.	la fel ca modul de defectare de la pct. 7.1.	4
8	Transmiterea mișcării de rotație	8.1. ruperea arborelui de torsiune	a) material cu defecte sau obosit b) sarcină excesivă	mișcarea de rotație nu se mai transmite	analiză materialului (defectoscopică) înainte de prelucrare	analiză defectoscopică periodică	3
		8.2. defectul ansamblului coroană dințată-roată dințată	a) îmbătrânire b) materiale cu defecte sau obosit c) defecte de fabricație	a) vibrații b) zgomot excesiv	Monitorizarea vibrațiilor și a zgomotului	a) verificare periodică b) analiza vibrațiilor	
		8.3. îmbătrânirea cauciucului bucsilor	îmbătrânirea sau oboseala cauciucului	a) afectează funcționarea transmisiei mișcării de rotație a motorului b) zgomot excesiv	monitorizarea vibrațiilor și zgomotului	schimbarea periodică a bucsilor	
9	Borne de contact	9.1 slăbirea conexiunilor	vibrații	alimentarea corectă a motorului este aleatoare	inspecție vizuală	întreținere periodică preventivă	3
		9.2. corodarea conexiunilor	a) oxidare b) sub acțiunea umidității formarea de alți compuși chimici	creșterea rezistenței de contact dintre bornă și cablul de alimentare			
Nr.	Motor part	Modul de defectare	Mecanism de defectare	Efectul defectului	Metode de detecție	Atenuarea efectului	Severitate
10	Senzorii de temperatură ai bobinelor statorului	10.1. întrerupere	a) vibrații b) dezlipirea terminalelor	pierderea monitorizării temperaturii	măsurarea continuității	a) înlocuirea senzorului defect b) repararea circuitului de măsurare	2
		10.2. pierderea preciziei	a) vibrații b) corodare sau contaminare c) îmbătrânire	monitorizare eronată	compararea cu o metodă alternativă de măsurare	înlocuirea senzorului defect	
11	Senzorii de temperatură ai rulmenților	11.1. întrerupere	a) vibrații b) dezlipirea terminalelor	pierderea monitorizării temperaturii	măsurarea continuității	a) înlocuirea senzorului defect b) repararea circuitului de măsurare	2
		11.2. pierderea preciziei	a) vibrații b) corodare sau contaminare c) îmbătrânire	monitorizare eronată	compararea cu o metodă alternativă de măsurare	înlocuirea senzorului defect	
12	Senzorul de rotație	12.1. întrerupere	a) vibrații b) temperatură	a) nu se generează semnal care conține informația privind viteza de rotație	vizualizare pe osciloscop a semnalului	c) înlocuirea senzorului defect repararea circuitului de măsurare	3
13	Ans. motor	12.1. vibrații	a) pierderea alinierii axiale sau unghiulare a rotorului b) defectarea rulmenților c) pierderea echilibrării rotorului d) neuniformitatea distanței dintre rotor și stator	a) scurtarea duratei de viață a rulmenților b) distrugerea rulmenților	măsurarea vibrațiilor	controlul atent pe fazele de fabricație	4

- 1 – defecte ce nu influențează funcționarea
- 2 – defecte incipiente reparabile
- 3 – defecte reparabile care pot întrerupe funcțiunea
- 4 – defecte reparabile care degradează performanțele
- 5 – defecte reparabile care întrerup funcționarea

1.2 Analiza FTA

Analiza arborelui de defecțiuni (FTA) identifică în mod clar relațiile de defecțiune și oferă o abordare metodică pentru a prezice probabilitatea ca anumite evenimente de nivel superior să se producă sau nu. Scopul principal al analizei este de a evalua probabilitatea evenimentului de nivel superior folosind metode analitice și/sau statistice de ultimă generație. Aceste calcule implică date cantitative despre fiabilitatea și mentenabilitatea componentelor sistemului, cum ar fi probabilitatea de defecțiune, rata de defecțiune, defecțiunea așteptată, timpul de nefuncționare, rata de reparații etc. Evenimentele și datele luate în considerare pentru

motorul MTA2 sunt cele prezentate în Fig. 8. Utilizând aceste date se obține rata de defectare previzionată $\lambda = 9,25E-03$.

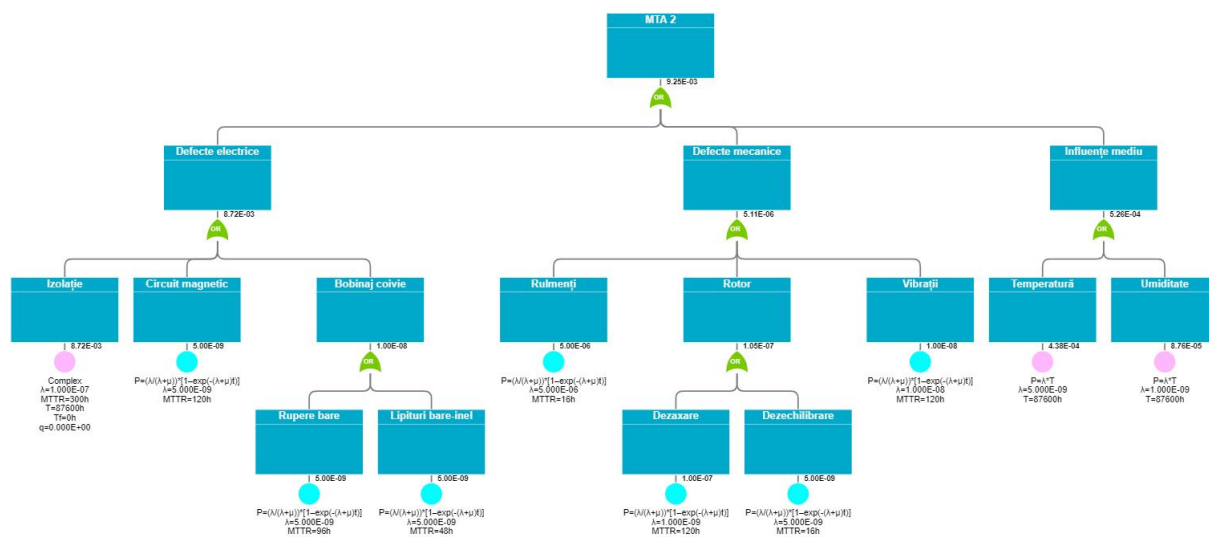


Fig. 8 – Analiza arborelui defecțiunilor utilizând ALD Reliability Software.

4. REZULTATE EXPERIMENTALE

În anul 2025 se află în exploatare un număr de 600 motoare MTA 2 care cumulativ au participat la mai mult de 75 milioane kilometri parcurși în cca. 2.150 mii ore. În timpul exploatarei s-au defectat două motoare. Perioada medie în care aceste motoare au fost utilizate este de 5 ani. Prin urmare, rata de defectare rezultată prin calcul pe baza informațiilor colectate din exploatare este $\lambda_{exp} = 7,61E-08$ defecte/oră

Cunoscând aceste date rezultă că rata de defectare calculată este de $7,61E-08$, mai bună decât $9,25E-03$ previzionată utilizând FTA. Diferența se datorează faptului că datele previzionate pentru defectele electrice și mecanice au fost foarte pesimiste.

5. CONCLUZII

Metodele de analiză utilizate pentru identificarea defectelor și a măsurilor de reducere a efectului consecințelor au condus la corecții în procesele de fabricație și întreținere preventivă. Fiabilitatea previzionată și cea rezultată din datele din exploatare sunt diferite. Considerând valoarea ratei calculate pe baza datelor rezultate din exploatare ca valoare reală ($7,61E-08$ defecte/oră) se pot face următoarele afirmații previzionale:

1. Într-un an numărul defectelor poate fi de cel mult $6,67E-04$
2. Un defect se poate produce la 1,49 ani de funcționare continuă. În fapt, locomotiva LEMA 6000 kW are un regim de funcționare de 8 ore/zi cu o disponibilitate de 95%. Prin urmare, timpul de apariție a unui defect este de 4,2465 ani sau pentru un parcurs de 250.000 km/an/locomotivă la 1.061.625 km.

Având în vedere planul de mentenanță preventivă și respectarea prevederilor acestuia, fiabilitatea calculată pe baza datelor din exploatare asigură siguranța funcționării fără defecte până la revizia generală efectuată la fiecare 500.000 km sau chiar reparația capitală efectuată la fiecare 1.000.000 km.

CONFIRMARE

Lucrarea a fost prezentată la Simpozionul de Mașini Electrice SME'XXI, ediția 2025.

BIBLOGRAFIE

1. B.T. Abhilash, H.M. Manjunatha N.A. Ranjan, M.E. Tejamoorthy, *Reliability assessment of induction motor drive using failure mode effects analysis*, IOSR Journal of Electrical and Electronics Engineering (IOSR-JEEE), **6**, 6, Jul. - Aug. 2013.
2. ANSI/ABMA 9 Load ratings and Fatigue Life for Ball Bearings Washington DC ABMA.
3. A. Siddique, G.S. Yadava, B. Singh, *A review of stator fault monitoring techniques of induction motors*, IEEE Transactions on Energy Conversion. **20**, 1, March 2005.
4. A.H. Bonnett, *Root Cause Failure Analysis for AC Induction Motors in the Petroleum and Chemical Industry*, IEEE Paper No. PCIC-2010-43.
5. P.S. Bhowmik, S. Pradhan, M. Prakash *Fault diagnostic and monitoring methods of induction motor: A Review*, International Journal of Applied Control, Electrical and Electronics Engineering (IJACEEE), **1**, 1, May 2013.
6. H.A. Bonnett, *Root cause AC motor failure analysis with a focus on shaft failures*, IEEE Transactions on Industry Applications, **36**, 5, Sept/Oct 2000.
7. M.B. House, C. Park, G.L. Flickinger, C.T. Fritz, H.S. Sutherland, T.P. Repoff, *Method and system for determining motor reliability*, US Patent Application Publication, US 2004/0044499 A1.
8. IEC 60812 *Failure modes and effects analysis (FMEA and FMECA)*.
9. IEEE 1415-2006 *Guide for Induction Machinery Maintenance Testing for Failure Analysis*.
10. IEEE Std 1566-2015 *Std for Performance of Adjustable Speed AC Drives Rated 375 kW and Larger*.
11. Igmarr Ed. Raul, Recalde Gregor, *Induction motors applications, control and fault diagnostics*, AvE4EvA 2015
12. S. Karmakar, S. Chattopadhyay, M. Mitra, S. Sengupta, *Induction Motor Fault Diagnosis: Approach through Current Signature Analysis*, Springer 2016
13. R. Lawrence, R. Hanna, B. Lockley, R. Paes, *Performance of adjustable speed ac drives rated 375 kw and larger*, IEEE Paper No. PCIC-2016-03, 2016
14. MIL-STD-1629A, MIL-STD-1629A Notice 1, MIL-STD-1629A Notice 2 – *Procedures for Performing a Failure Mode, Effects and Criticality Analysis*, 1980/1983/1984
15. G.C. Montanari, L. Simoni, *Aging Phenomenology and Modeling*, IEEE Transactions on Electrical Insulation, **28**, 5, October 1993
16. ***Root Cause Failure Analysis, Electrical Apparatus Service Association, Inc. 2004
17. Softronic, *Specificație tehnică motor MTA*, 2008
18. T.O. Vaag, D. Magnus, *A survey of faults on induction motors in offshore oil industry, petrochemical industry, gas terminals and oil refineries*, IEEE Paper No. PCIC-94-01, 1994
19. P. Waide, C.U. Brunner, *Energy-Efficiency policy opportunities for electric motor-driven systems*, International Energy Agency, 2011
20. F. Wang, Z. Zhang, X. Mei, J. Rodríguez, R. Kennel, *Advanced control strategies of induction machine: field oriented control, direct torque control and model predictive control*, Energies, **11**, 1, 120, 2018
21. M. Wlaran, M. Subudhi, *Aging assessment of large electric motors in nuclear power plants*, Brookhaven National Laboratory, 1996