



**UNIVERSITATEA NAȚIONALĂ DE ȘTIINȚĂ ȘI  
TEHNOLOGIE POLITEHNICA BUCUREȘTI  
ȘCOALA DOCTORALĂ DE INGINERIE ELECTRICĂ**



## **REZUMAT**

# **Analiza și diagnosticarea prin modele în elemente finite a stărilor de funcționare defectuoasă a mașinilor electrice**

## **Teză de doctorat**

**Conducător științific:**

**Prof. univ. dr. ing. Virgiliu FIREȚEANU**

**Doctorand:**

**Ing. Alexandru-Ionel CONSTANTIN**

**BUCUREȘTI**

**2023**

## CONȚINUT

<b>CONȚINUT</b> .....	<b>2</b>
<b>CAPITOLUL 1 STADIUL ACTUAL AL TEHNICILOR DE DIAGNOSTICARE A DEFECTELOR MAȘINILOR ELECTRICE</b> .....	<b>5</b>
<b>1.1. Introducere</b> .....	<b>5</b>
1.2. Surse de defecte la motoarele asincrone .....	5
<b>1.3. Tipuri de defecte ale motoarelor asincrone</b> .....	<b>6</b>
<b>1.4. Tipuri de tehnici de monitorizare a stării și de diagnosticare a defectelor</b> .....	<b>7</b>
1.5. Descrierea tezei.....	10
<b>CAPITOLUL 2 MODELE CU ELEMENTE FINITE FLUX 3D ALE MOTORULUI ASINCRON</b> .....	<b>11</b>
2.1. Descrierea motorului asincron utilizat în simulările cu elemente finite .....	11
2.2. Motorul cu inducție și modelele cu elemente finite 3D.....	12
<b>2.3. Formularea câmpului electromagnetic 3D în motoarele asincrone</b> .....	<b>14</b>
2.4. Analiza pas cu pas în domeniul timpului cu elemente finite .....	14
<b>CAPITOLUL 3 INFLUENȚA DEFECTELOR ASUPRA CUPLULUI ELECTROMAGNETIC</b> .....	<b>15</b>
3.1. Comparație între defectele scurtcircuit, bară întreruptă, excentricitate și starea sănătoasă	15
3.2. Analiza stărilor duble de defect .....	16
3.2.1. Comparație între defectul de scurtcircuit dublu cu bara întreruptă, defectul de scurtcircuit singular cu bara întreruptă și starea sănătoasă .....	16
3.2.2. Comparație între bara întreruptă cu defect dublu și excentricitate, bara întreruptă individual și excentricitate și starea sănătoasă.....	17
3.2.3. Comparație între excentricitatea cu defect dublu și excentricitatea individual, scurtcircuit și starea sănătoasă .....	17
3.2.4. Comparație între defectele duble scurtcircuit cu bară întreruptă, bară întreruptă și excentricitate, excentricitate și scurtcircuit, defectele individuale scurtcircuit, bară întreruptă, excentricitate și stare sănătoasă.....	17
3.3. Defectul triplu scurtcircuit și bară întreruptă și excentricitate. Comparație între defectul triplu SHC&BB&ECC, defectele individuale scurtcircuit, bară întreruptă, excentricitate și starea sănătoasă.....	18
<b>CAPITOLUL 4 INFLUENȚA DEFECTELOR ASUPRA FORȚEI ELECTROMAGNETICE UNILATERALE</b> .....	<b>19</b>
4.1. Funcționarea motorului în sarcină .....	19
4.1.1. Comparație între defectele individuale scurtcircuit, bara întreruptă, excentricitate și starea sănătoasă.....	19
4.1.2. Analiza stărilor de defect dublu .....	20

---

4.1.3. Analiza defectului triplu scurtcircuit și bară întreruptă și excentricitate .....	22
4.2.3. Comparație între defectul triplu scurtcircuit și bară întreruptă și excentricitate, defectele individuale scurtcircuit, bară întreruptă, excentricitate și starea sănătoasă.....	24
4.2. Funcționarea fără sarcină a motorului.....	24
4.2.1. Comparație între defectele individuale de scurtcircuit, bara întreruptă, excentricitate și starea sănătoasă.....	24
4.2.2. Analiza stărilor defect dublu.....	24
4.2.3. Comparație între defectul triplu de scurtcircuit și bara întreruptă și excentricitate, defectele de scurtcircuit, bară întreruptă, excentricitate și starea sănătoasă.....	26
<b>CAPITOLUL 5 DETECTAREA DEFECTELOR PRIN CURENȚII STATORICI.....</b>	<b>26</b>
5.1. Detectarea stărilor cu un defect individual în funcționarea motorului în sarcină.....	26
5.1.1. Detectarea stărilor cu un defect individual prin armonici ale curentului $I_U$ .....	28
5.1.2. Detectarea stărilor cu un defect individual prin armonici ale curentului $I_V$ .....	29
5.1.3. Detectarea stărilor cu un defect individual prin armonici ale curentului $I_W$ .....	30
5.2. Studiul detectării stărilor de defect dublu .....	30
5.2.1. Detectarea stărilor de defect dublu prin armonici ale curentului $I_U$ .....	31
5.2.2. Detectarea stărilor de defect dublu prin armonici ale curentului $I_V$ .....	31
5.2.3. Detectarea stărilor de defect dublu prin armonici ale curentului $I_W$ .....	31
5.3. Studiul detectării stării de defect triplu.....	32
5.3.1. Detectarea stării de defect triplu prin armonici ale curentului $I_U$ .....	32
5.3.2. Detectarea stării de defect triplu prin armonici ale curentului $I_V$ .....	32
5.3.3. Detectarea stării de defect triplu prin armonici ale curentului $I_W$ .....	33
<b>CAPITOLUL 6 DETECTAREA DEFECTELOR PRIN INDUCȚIA MAGNETICĂ DIN PROXIMITATEA MOTORULUI.....</b>	<b>33</b>
6.1. Detectarea defectelor individuale .....	33
6.2. Detectarea defectelor duble.....	37
6.3. Detectarea defectului triplu, SHC&BB&ECC.....	38
<b>CAPITOLUL 7 INVESTIGAREA EXPERIMENTALĂ A DEFECTULUI DE SCURT-CIRCUIT.....</b>	<b>39</b>
7.1. Rezultatele experimentale obținute pentru motorul cu inducție în cazul defectului de scurtcircuit.....	39
<b>CONCLUZII GENERALE, CONTRIBUȚII LA TEZĂ ȘI PROPUNERI PENTRU CERCETĂRI VIITOARE .....</b>	<b>43</b>
C1. CONCLUZII GENERALE .....	43
C2. CONTRIBUȚIILE TEZEI .....	44
C3. PROPUNERI PENTRU PERSPECTIVE VIITOARE .....	44

---

**REFERINȚE** ..... 44

## CAPITOLUL 1 STADIUL ACTUAL AL TEHNICILOR DE DIAGNOSTICARE A DEFECTELOR MAȘINILOR ELECTRICE

### 1.1. Introducere

Mecanismele de detectare a defectelor și de siguranță sunt la fel de vechi ca și mașinile electrice în sine. Clienții și producătorii obișnuiau să se bazeze pe scheme simple de protecție, cum ar fi cele la supracurent, supratensiune, defecte de împământare și așa mai departe pentru a asigura performanțe sigure și fiabile.

Cu toate acestea, pe măsură ce complexitatea lucrărilor efectuate de aceste mașini electrice a crescut, a crescut și necesitatea dezvoltării unor metode îmbunătățite de detectare a defectelor. Perioadele neprevăzute de nefuncționare ale utilajelor pot perturba fluxul de producție și pot provoca pierderi financiare semnificative. Ca urmare, identificarea timpurie a defectelor reprezintă un element critic. [1]

Conform cercetărilor privind durabilitatea mașinilor electrice, orice componentă se poate defecta, iar posibilitatea de defectare variază în funcție de tipul și designul mașinii, condițiile de funcționare și de aplicație [2,3]. Pentru o lungă perioadă de timp, supravegherea termică, a vibrațiilor și diagnosticarea off-line au reprezentat mecanismele primare pentru monitorizarea stării dispozitivelor electrice.

În această teză este prezentat un studiu asupra trei tipuri de defecte și combinațiile acestora utilizând modele cu elemente finite 3D în cazul unei mașini cu inducție, precum și o serie de rezultate experimentale. Tehnica de diagnosticare discutată și propusă poate fi extinsă și aplicată și altor tipuri de mașini electrice. În acest prim capitol sunt prezentate informații generale referitoare la sursele de defecte la motoarele asincrone, tipurile de defecte, mecanismele de defectare și metodele de diagnosticare a defectelor.

### 1.2. Surse de defecte la motoarele asincrone

Pentru a înțelege apariția defectului și pentru construirea schemei de detectare a defectului, trebuie cunoscute în primul rând sursele și cauzele deteriorării motoarelor cu inducție.

Tabelul 1.1 prezintă principalele surse de daune și tipurile de defecte pentru motoarele electrice, așa cum este propus de Al-Kazzaz în [4].

Tabelul 1.1 Surse de daune și tipuri de defectei în ceea ce privește motoarele electrice

SURSE DE DEFECTE				
SURSE INTERNE		SURSE EXTERNE		
MECANICE	ELECTIRCE	MECANICE	ELECTIRCE	MEDIU
- deplasarea bobinelor - lovituri ale rotorului -defecte ale rulmenților -excentricitate	- defecte de izolare - bare rotor întrerupte - defecte ale circuitului magnetic	- sarcină pulsatorie - supraîncărcare - montare defectuoasă	- tensiuni tranzitorii - tensiuni dezechilibrate - variații de tensiune (fără încărcare, întreruperi, variații reduse)	-temperatură -umiditate -praf -ciuperci

Această clasificare este utilă pentru analizarea cauzelor defectelor și pentru determinarea planului de întreținere care necesită cunoașterea nivelului de stres electric, mecanic și de mediu care poate produce defecte.

Luând în considerare probabilitatea de apariție, defectele motorului electric pot fi împărțite în patru grupe principale [5]: cea mai importantă pondere este cea a defectelor lagărului (40%), urmată de defecte ale statorului (38%) și de defecte ale rotorului (10%).

### 1.3. Tipuri de defecte ale motoarelor asincrone

Distribuția generală a defectelor mașinii electrice (EM) variază în funcție de tipul specific de mașină și de parametrii operaționali ai acesteia. După cum este ilustrat în [6], defectele convenționale ale mașinilor electrice pot fi clasificate ca defecte electrice, mecanice, termice, de mediu și de control. Aceste tipuri de defecte sunt definite în [7–9].

Defectele electrice sunt cel mai frecvent tip de defect la mașinile electrice, și apar în principal pe stator. Acestea pot să apară ca urmare a defectelor de izolație, a scurtcircuitelor, a circuitelor deschise sau a altor probleme ale componentelor electrice ale mașinii. Următoarele elemente reprezintă dintre cele mai frecvente cauze ale defectelor electrice: Defecte ale statorului care determină deschiderea sau scurtarea unei înfășurări de fază; Conectarea necorespunzătoare a înfășurărilor statorului; Inversarea fazei; tensiuni mai mari sau mai mici; Defecte de scurtcircuit între spire; Defecte de împământare; Curentul de mod comun (CMV) și curentul de rulment (BC).

Defectele mecanice sunt al doilea cel mai frecvent tip de defect la mașinile electrice, după defectele electrice. Acestea pot fi cauzate de rulmenți uzați, arbori nealiniați, sarcini dezechilibrate sau alte probleme mecanice ale mașinii. Acest tip de defect se regăsește cel mai frecvent pe rotorul mașinii electrice. Defectele mecanice pot fi clasificate în următoarele categorii: Defect de excentricitate; Inele de capăt ale rotorului deteriorate sau bare sparte pe rotor; Rulmenți ruși, Cutie de viteze deteriorată și înfășurare rotor scurtcircuitată; Îndoirea arborelui care poate provoca o apropiere între stator și rotor, deteriorând înfășurarea; Bară rotor întreținută (etichetată ca BB).

Defectele termice: Cele mai frecvente cauze ale acestor probleme la mașinile electrice se datorează deteriorării rulmenților și izolației, ambele conducând la creșterea temperaturii mașinii. Următoarele elemente reprezintă principalele cauze ale defectelor termice: Supraîncălzirea; Defecte ale izolației; Suprasarcina.

Defectele datorate mediului: În comparație cu defectele menționate mai sus și apariția acestora, la mașinile electrice defectele de mediu sunt cele mai puțin frecvente. Cele mai întâlnite cauze ale defecte de mediu se datorează expunerii mașinii la apă, praf și umiditate, expunere care provoacă ruginirea și alte tipuri de daune asociate. Pot fi afectate atât statorul, cât și rotorul mașinii. Câteva exemple de defecte de mediu sunt: Temperatura ambiantă; Umezeala; Vibrațiile.

Defectele de control: Acestea pot să apară ca urmare a unor probleme cu sistemul de control sau software-ul utilizat, determinând funcționarea incorectă sau defectarea mașinii. Defectele de control ale mașinii electrice pot fi clasificate ca: Defect de software; Defect al senzorului; Defect al sursei de alimentare.

Defectele electrice sunt cele mai frecvente tipuri de defecte la mașinile electrice. Următorul tip frecvent întâlnit este defectul mecanic. Însă, distribuția specifică a defectelor poate diferi în funcție de tipul de mașină și de condițiile de funcționare, după cum este prezentat în mod explicit în tabelul 1.2.

Tabelul 1.2 Defecte ale mașinilor electrice și cele mai recente tendințe de diagnosticare ale acestora

Categorie de defecte	Descriere	Clasificare	Referințe
Electric	Înfășurare în gol/scurtcircuit	Stator	[10]
	Conexiune de înfășurare necorespunzătoare	Stator	[11,12]
	Inversarea fazei	Alimentare	[13]
	Supratensiune sau subtensiune	Alimentare	[14-17]
	Scurtcircuit între spire	Înfășurare	[12,18]
	Bară rotor întreruptă/inel de capăt	Rotor	[19-25]
	Stator deschis/scurtcircuit	Stator	[26]
	Deteriorarea izolației	Stator	[27-29]
Mecanic	Excentricitate	Rotor	[27-29]
	Dezechilibru mecanic	Rotor	[25,30,31]
	Defect al rulmenților	Rotor	[32,33]
	Arbore îndoit	Rotor	[34-36] [37]
Termic	Supraîncălzire	Alimentare	[38,39]
	Defect de izolație	Alimentare	[40]
	Suprasarcină	Alimentare	[41-43]
	Dezechilibru termic	Rotor	[44-46]
Mediu	Temperatura ambiantă	Carcasă	[47-49]
	Umezeală	Mediu	[48,49]
	Vibrații	Rotor	[38]
Control	Defectarea sursei de alimentare	Alimentare	[50]
	Defectarea a senzorului de curent	Senzor	[51]
	Defectarea senzorului de tensiune	Senzor	[52]
	Defectarea senzorului de viteză	Senzor	[52-56]

Datorită efectului de cuplare între diferite variabile de stare ale mașinilor electrice, un tip de defect poate da naștere în lanț și altor defecte. De exemplu, dacă unele bare sunt rupte, legătura fluxului net nu mai este zero, conducând la generarea de curenți turbionari în arbore și rulmenți.

#### 1.4. Tipuri de tehnici de monitorizare a stării și de diagnosticare a defectelor

Această secțiune examinează cu atenție tehnicile de monitorizare pentru condițiile de monitorizare adaptate și de diagnosticare de defecte, evidențiind cele mai eficiente și utile metode. Pentru determinarea stării de sănătate a unui sistem de acționare EM, pentru diagnosticarea defectelor pot fi utilizate atât metodele invazive cât și neinvazive. Această metodă de detectare a defectelor nu necesită contact direct cu sistemul de acționare al motorului investigat [57]. Folosind măsurători sau semnale din afara sistemului, aceste tehnici analizează comportamentul sistemului și caută problemele potențiale. Metodele invazive de diagnosticare a defectelor, pentru identificarea defectelor, implică contact direct cu sistemul.

Metodele comune de monitorizare a stării (CM) care utilizează datele de la senzori și analiza semnăturii electrice (ESA) sunt utile pentru evaluarea stării EM, în special a mașinii de

inducție (IM). Analiza semnăturii curentului din motor (MCSA) este acceptată pe scară largă ca fiind în industrie o metodă standard pentru analiza semnăturilor în detectarea defectelor IM. Semnătura semnalului curentului este examinată și interpretată pentru a identifica și localiza problemele potențiale din cadrul sistemului motor [58]. ESA, în procesul său de evaluare, include analiza circuitelor motorului. Rezistența, unghiul de fază, răspunsul curentului (CR), răspunsul în frecvență (FR) și impedanța, inductanța și defectele de împământare comparabile toate fac parte din proces. În trecut, pentru detectarea defectelor mașinilor electrice, au fost utilizate mai multe strategii de monitorizare a stării. Câteva dintre aceste tehnici sunt descrise în [59-67]: Analiza semnăturii curentului în motor [68]; Analiza semnăturilor de tensiune [69]; Abordarea Park extinsă [70]; Analiza semnăturilor de putere instantanee [71]; Analiza parametrilor de supraveghere a stării, cum ar fi temperatura, perturbațiile, variația vitezei și fluxul magnetic; Senzori de monitorizare a stării (senzorii de vibrații, cum ar fi accelerometrele și sondele de proximitate, sunt utilizați în mod obișnuit în diverse aplicații; echipamente sensibile la temperatură, inclusiv termocupluri și detectoare de temperatură cu rezistență; Detectoare de curent, inclusiv senzori de efect Hall și transformatoare de curent; Microfoane și senzori ultrasonici, care sunt incluse în categoria senzorilor acustici; monitorizarea pe baza nivelurilor de emisii); Diagnostice care implică supratensiuni și descărcări parțiale; Examinarea circuitului motorului.

Pentru procedurile de diagnosticare a defectelor există mai multe clasificări, cum ar fi: metodele invazive și neinvazive, tehnicile convenționale, procesarea semnalelor sau tehnicile bazate pe modele care prezintă diferitele tehnici convenționale de monitorizare a stării de defect.

Aplicarea metodologiilor bazate pe semnale în domeniul CM și diagnosticarea defectelor mașinilor electrice implică examinarea și analiza semnalelor multiple obținute de la aceste mașini. Această analiză își propune să identifice orice nereguli, abateri sau semnături de eroare care pot fi prezente. [72]. Metodologiile menționate anterior se concentrează în primul rând pe extragerea datelor relevante din semnale pentru a evalua starea mașinii. Aceste semnale cuprind, printre altele, o serie de parametri, cum ar fi vibrațiile, curentul, temperatura și emisiile acustice. Prin examinarea acestor semnale, pot fi identificate anomalii, abateri sau semnături distincte de defect, oferind informații critice despre starea operațională a mașinilor. Prin interpretarea atentă a modelelor și variațiilor semnalului, aceste tehnici permit inginerilor și experților să identifice rapid problemele potențiale, facilitând intervențiile în timp util și strategiile pro active de întreținere pentru atenuarea timpului de nefuncționare și pentru optimizarea fiabilității și eficienței generale a mașinilor electrice.

În tehnicile bazate pe semnal din cadrul monitorizării stării și diagnosticării defectelor, semnalului pentru a extrage caracteristicile de eroare în semnătura datelor senzorilor, sunt utilizate diverse metodologii de procesare împreună cu abordările fundamentale precum transformata Fourier rapidă (FFT), transformatele Fourier de scurtă durată (STFT) și analiza timp-frecvență (TFA). Sunt importante și Distribuția Winger-Viile, tehnicile mai sofisticate și avansate, cum ar fi transformata wavelet, transformata Hilbert-Huang, clasificarea semnalelor multiple (MUSIC), descompunerea modului empiric (EMD) și analiza ciclostaționară (CSA). FFT și STFT sunt cele mai comune tehnici de procesare a semnalului pentru analiza spectrului de frecvențe pentru urmărirea frecvenței defectului în semnătura datelor furnizate de senzor. Transformata wavelet oferă o analiză cu rezoluție multiplă, evidențiind caracteristici ascunse, la diferite scări, atât în domeniul timpului cât și în cel al frecvenței. EMD împarte semnalele în funcții intrinseci, facilitând detectarea modelelor de defecte complexe și non-staționare. CSA valorifică proprietățile ciclice ale semnalelor, identificând în mod eficient componentele ciclostaționare legate de tipuri specifice de defecte. Prin valorificarea acestei game de tehnici avansate de procesare a semnalului,



monitorizării stării și diagnosticarea defectelor se realizează o înțelegere cuprinzătoare a comportamentului utilajului, ceea ce permite detectarea timpurie și diagnosticarea precisă necesare pentru implementarea de strategii optimizate de întreținere.

Implementarea metodologiilor bazate pe modele pentru CM și diagnosticarea defectelor (FD) aferente mașinilor electrice, pentru evaluarea performanța motorului și pentru identificarea oricăror probleme pertinente sau abateri de la criteriile operaționale stabilite [74,75], se bazează pe aplicarea modelelor matematice. Modelele analitice, analiza elementelor finite (FEA), procesarea semnalelor, filtrarea Kalman (KF) și estimarea stării, AI, rezonanța stocastică și învățarea automată sunt principalele tehnici bazate pe modele utilizate în FD. Tehnicile bazate pe modele, pentru mașinile electrice CM și FD, oferă beneficii semnificative. Aceste abordări permit anticiparea defectelor, întreținerea predictivă (PJV1), fiabilitatea îmbunătățită și performanța îmbunătățită. Categoriile menționate mai sus pot fi aplicate și în contextul tehnicilor AI utilizate în scopuri de diagnosticare. Implementarea PJV1 folosind AI necesită integrarea inteligenței umane cu tehnici de învățare automată, și anume antrenarea algoritmilor în scopul diagnosticării defectelor mașinii. [76,77].

Sectoarele academic și industrial investesc în prezent resurse semnificative în cercetare și dezvoltare (C&D) referitoare la CM și DI, vizând în mod specific problemele care decurg din tranziției invertoarelor de înaltă frecvență și comportamentele asociate acestora [78]. În acest domeniu, AI a transformat semnificativ domeniul CM și FD al mașinilor electrice. Tehnici precum rețelele neuronale artificiale (ANN) utilizează straturi interconectate complexe pentru învățarea modele complexe din date, permițând detectarea și clasificarea precisă a erorilor. Logica fuzzy și sistemele fuzzy adaptive utilizează variabilele lingvistice pentru captarea incertitudinilor din sistem, facilitând luarea unor decizii robuste pentru scenariile complexe de diagnosticare a defectelor. De asemenea, mașinile vectoriale de suport (SVM) excelează la sarcinile de clasificare prin găsirea limitelor decizionale optime în cadrul datelor de dimensiuni mari. Pentru imitarea expertiza umane, sistemele expert combină cunoștințele din domeniu cu motoarele de inferență, făcându-le capabile să diagnosticheze defectele complexe. Aceste metodologii bazate pe AI au inaugurat o nouă eră de monitorizare avansată a stării, oferind precizie, eficiență și adaptabilitate pentru menținerea sănătății și longevității mașinilor electrice.

Metodele avansate de monitorizare a stării și cele de diagnosticare a defectelor aferente motorului de inducție au apărut datorită progreselor tehnologice și în domeniul cercetării. În tabelul 1.3, autorii prezintă o listă de metode, avansate și recente, privind monitorizarea stării defectelor mașinilor de inducție împreună cu tipurile și subtipurile lor ulterioare.

Tabelul 1.3. Tehnici de ultimă generație și cele mai recente tendințe în monitorizarea stării și detectării defectelor.

Ultimele tendințe în tehnici	Aplicație caracteristică
Tehnici avansate în procesarea semnalului	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Analiza timp-domeniu [80]:                             <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Analiza medie-pătratică și a amplitudinii [81,82];</li> <li>○ Testarea Kurtosis [83];</li> <li>○ O investigație a urmării ordinii armonice [84];</li> <li>○ Media sincronă în timp, adesea cunoscută sub numele de TSA [85-87];</li> <li>○ Analiza datelor statistice [88];                                     <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Rezonanță stocastică [89].</li> </ul> </li> <li>○ Descompunerea semnalului.</li> </ul> </li> <li>• Analiza frecvență-domeniu:</li> </ul>

Ultimele tendințe în tehnici	Aplicație caracteristică
	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Transformata Fourier rapidă, abreviată ca FFT;</li> <li>○ Transformata wavelet [87];</li> <li>○ Analiza spectrală la niveluri superioare.</li> <li>• Analiză frecvență timp [90,91]:</li> <li>○ Spectrogramă; Transformarea Hilbert–Huang în plus față de extinderea sa: <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Obținerea frecvenței și intensității semnalului instantaneu.</li> </ul> </li> <li>○ Transformata Fourier de scurtă durată (cunoscută și ca STFT);</li> <li>○ Transformarea pachetelor Wigner [92].</li> <li>○ Transformata Wavelet–Ville [93];</li> <li>• Tehnici de analiză de înaltă rezoluție [94,95]: <ul style="list-style-type: none"> <li>○ MUZICĂ [96].</li> </ul> </li> </ul>
Tehnică inteligentă bazată pe calculator	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Inteligența artificială [97];</li> <li>• Abordare bazată pe date [98–100];</li> <li>• Învățare automată (ML) [79]; <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Reducere caracteristică înalt dimensională [101.102].</li> </ul> </li> <li>• Extragerea datelor: fuziunea datei și recunoașterea modelelor [103].</li> </ul>
Sisteme expert	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sisteme bazate pe norme [104,105]; <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Logică fuzzy [106].</li> </ul> </li> <li>• Raționament bazat pe caz [107]: <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Raționament bazat pe experiență.</li> </ul> </li> </ul>
Prognosticuri și managementul sănătății (PHM)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Recunoașterea diagnosticelor mai complexe prin progresul tehnologic [108];</li> <li>• Prognosticuri bazate pe clasificatori inteligenți [109].</li> </ul>

## 1.5. Descrierea tezei

**Primul capitol** prezintă o serie de surse de defecte pentru motoarele asincrone, tipuri de defecte la motoarele asincrone, o serie de defecte ale mașinilor electrice ca și cele mai recente tendințe de diagnosticare a defectelor, tipurile de tehnici de monitorizare a stării și de diagnosticare a defectelor, tipuri tradiționale de monitorizare a stării și unele dintre cele mai recente tendințe și evoluții în monitorizarea stării. Caracteristicile mașinii asincrone utilizate ca referință pentru modelele cu elemente finite 3D, dezvoltate folosind software-ul Altair Flux 3D pentru analiza detectării, evoluției și influenței defectului asupra cuplului, forței electromagnetice unilaterale, curenților și câmpului magnetic din proximitatea mașinii, sunt prezentate în **capitolul doi**. Mașina de inducție considerată a fost produsă de UMEB și a fost aleasă deoarece prezintă încă 3 conexiuni externe suplimentare pe o fază după prima, a doua și a patra bobină elementară, care pot fi utilizate pentru simularea defectului de scurtcircuit. De asemenea, sunt descrise modelele finite dezvoltate pentru fiecare defect studiat și formularea câmpului electromagnetic. **Capitolul trei** analizează influența defectelor individuale și combinația lor asupra cuplului electromagnetic în funcționarea motorului în sarcină nominală (2880 rpm), iar **capitolul patru** prezintă influența defectelor asupra forței electromagnetice unilaterale în rotor și a modului în care aceasta acționează asupra rotorului. Rezultatele legate de detectarea defectelor individuale, duble și triple în motorul de inducție cu colivie de veredită, prin influența lor asupra armonicilor curenților statorici în sarcină (2880 rpm), sunt prezentate în **capitolul cinci**. Referitor la **capitolul șase**, cel mai important capitol al tezei,

acesta prezintă aspecte legate de influența defectelor individuale și a combinației lor asupra inducției magnetice în partea laterală și în proximitatea înfășurărilor finale, în vederea identificării armonicilor ce caracterizează fiecare defect pentru detecție și identificare. **Cap. șapte** prezintă rezultatele experimentale obținute din analiza influenței defectului de scurtcircuit asupra câmpului magnetic din vecinătatea motorului asincron investigat, prin variația în timp a tensiunii de ieșire, a senzorilor bobinei în cazul motorului sănătos și cu defecte, în cazul funcționării fără sarcină a motorului.

## CAPITOLUL 2 MODELE CU ELEMENTE FINITE FLUX 3D ALE MOTORULUI ASINCRON

În acest capitol sunt prezentate caracteristicile mașinii asincrone folosită ca referință pentru modelele cu elemente finite 3D dezvoltate cu ajutorul software-ului Altair Flux 3D pentru analiza detecției defectului, evoluției și influenței asupra cuplului, forței electromagnetice unilaterale, curenților și câmpului magnetic din proximitatea mașinii. Mașina de inducție este produsă de UMEB și a fost aleasă deoarece are încă 3 conexiuni externe suplimentare pe o fază după prima, a doua și a patra bobină elementară, putând fi utilizată pentru simularea defectului de scurtcircuit. De asemenea, sunt descrise modelele finite dezvoltate pentru fiecare tip de defect studiat ca și formularea câmpului electromagnetic.

### 2.1. Descrierea motorului asincron utilizat în simulările cu elemente finite

Motorul de inducție pentru care sunt studiate defectele, Fig. 2.1, are: motor cu inducție cu 2 poli; 3 faze conectate în stea;  $P_n = 7,5$  kW puterea la sarcină nominală;  $U_{nf} = 380$  V (valoarea de la fază la zero) tensiunea nominală a sursei;  $f_{ln} = 50$  Hz frecvența nominală a sursei.

Acest motor are următoarele caracteristici principale, evidențiate în Fig. 2.1: Armătura statorului cu 24 de creștături, Armătura rotorului cu 20 de creștături. Diametrul exterior al miezului magnetic al statorului de 212 mm. Diametrul interior al statorului de 120 mm. Diametrul exterior al rotorului de 119 mm; Grosimea întrefier de 0,5 mm. Diametrul interior al miezului magnetic al rotorului de 40 mm. Lungimea miezurilor magnetice ale statorului și rotorului de 125 mm.

Fig. 2.2 prezintă înfășurarea statorului. Fiecare fază are 208 spire și 8 bobine elementare grupate câte 4. Rezistența fiecărei faze este de 1,54 la 155 °C.Ω

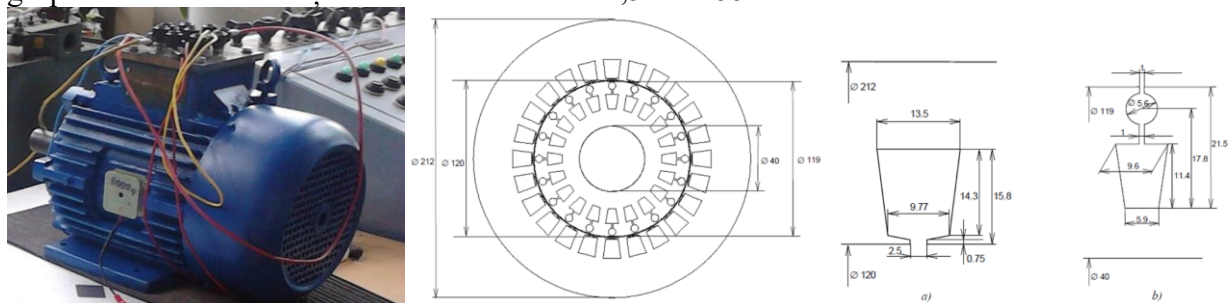


Fig. 2.1. Motorul cu inducție utilizat pentru studiu, secțiunea transversală a armăturilor statorului și rotorului și dimensiunile creștăturii: a) creștătură statorică; b) creștătură rotorică

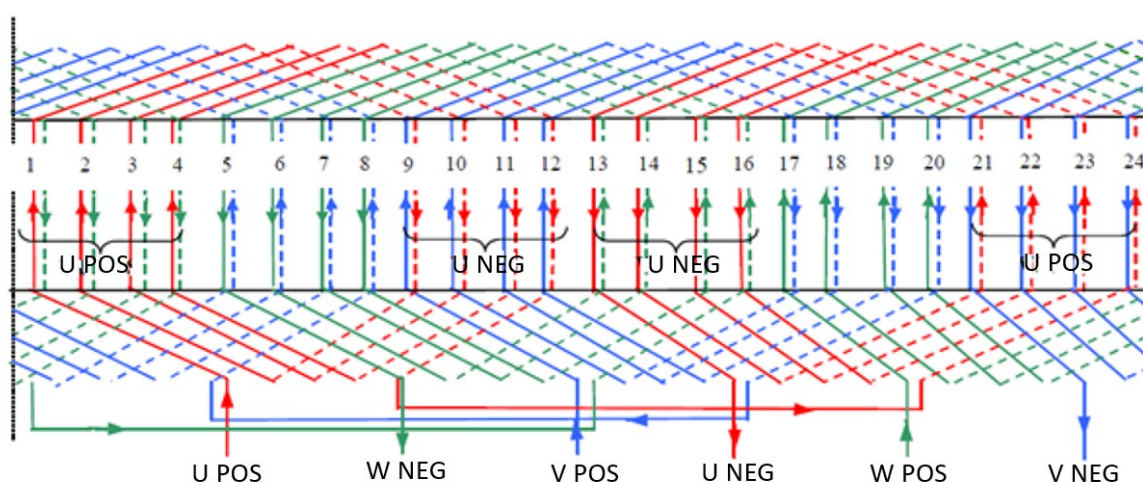


Fig. 2.2. Înfășurarea statorului

## 2.2. Motorul cu inducție și modelele cu elemente finite 3D

Acest capitol prezintă modelele cu elemente finite 3D ale motorului asincron, Fig. 2.3.

Geometria 3D a domeniului de calcul al câmpului electromagnetic, Fig. 2.5. include: statorul, fără cadru, și miezurile rotorului, regiunile magnetice neliniare și neconductoare; 24 creștături statorice; 20 creștături rotorice, colivie de veveriță din aluminiu cu o rezistivitate de  $0,048e^{-6} \Omega m$ ; întrefier cu grosimea de 0,5 mm.

Diametrul exterior al miezului statorului este de 212 mm, iar lungimea axială a miezurilor magnetice este de 125 mm. Este luată în considerare o regiune de aer infinit extinsă în jurul motorului.

Fig. 2.3. prezintă jumătatea geometriei 3D a motorului, unde unele părți au fost făcute invizibile pentru a putea vedea barele coliviei de veveriță și înfășurările din creștăturile statorului.

Modelul cu elemente finite 3D este cuplat cu un circuit electric, Fig. 2.4. Circuitul conține cele trei faze ale înfășurărilor statorului. Fiecare fază conține o sursă de tensiune și 8 bobine elementare. În faza U există un rezistor, RSHC, în paralel cu o bobină elementară, U1. Am folosit rezistorul RSHC pentru a simula scurtcircuitul dintre spirele unei bobine elementare de fază U, bobina U1, Fig. 2.5.

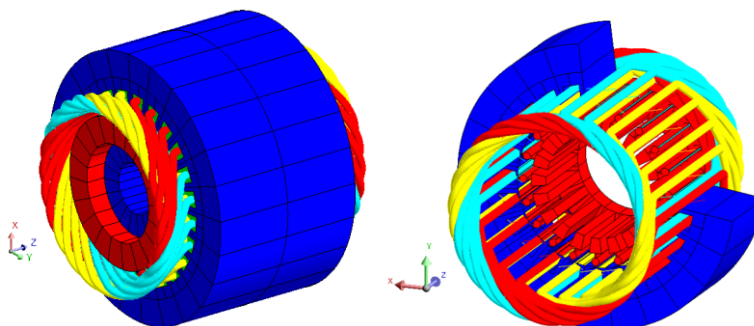


Fig. 2.3. Geometria 3D a motorului asincron în colivie de veveriță

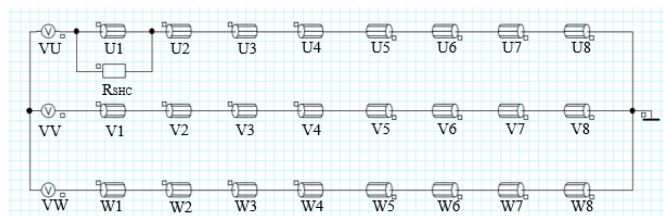


Fig. 2.4. Circuitul electric asociat modelului cu elemente finite

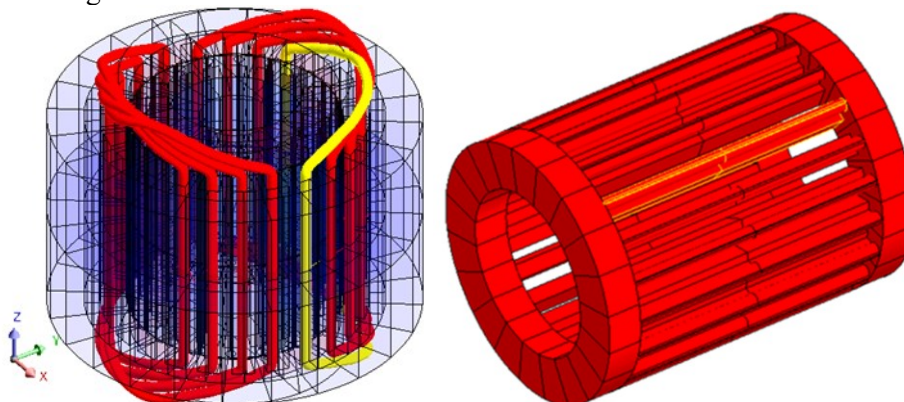


Fig. 2.5. Înfășurarea fazei U, cu o bobină elementară în scurtcircuit (galben) și colivia de veveriță cu bara care va fi întreruptă (galben)

Stările studiate aferente motorului asincron sunt:

- **Sănătos (HE):** Toate barele au aceeași rezistivitate, rezistența la scurtcircuit are valoarea  $R_{SHC} = 1 \text{ [M}\Omega\text{]}$  și spațiul de aer al motorului este uniform;
- **Scurtcircuit (SHC):** Toate barele au aceeași rezistivitate, rezistența la scurtcircuit are valoarea  $R_{SHC} = 9 \text{ [}\Omega\text{]}$  și spațiul de aer al motorului este uniform;
- **O bară întreruptă (BB):** Toate barele au aceeași rezistivitate, cu excepția uneia care este cu  $10^7$  mai mare, Fig. 2.5, rezistența la scurtcircuit are valoarea  $R_{SHC} = 1 \text{ [M}\Omega\text{]}$  și întrefier al motorului este uniform;
- **Excentricitate statică (ECC):** Toate barele au aceeași rezistivitate, rezistența la scurtcircuit are valoarea  $R_{SHC} = 1 \text{ [M}\Omega\text{]}$  și un întrefier în motor constant neuniform, figura 2.6;
- **Scurtcircuit și o bară întreruptă (SHC &BB):** Toate barele au aceeași rezistivitate, cu excepția uneia care este cu  $10^7$  mai mare, rezistența la scurtcircuit are valoarea  $R_{SHC} = 9 \text{ [}\Omega\text{]}$  și întrefier al motorului este constant uniform;
- **O bară întreruptă și excentricitate statică (BB&ECC):** Toate barele au aceeași rezistivitate, cu excepția uneia care este cu  $10^7$  mai mare, rezistența la scurtcircuit are valoarea  $R_{SHC} = 1 \text{ [M}\Omega\text{]}$  și un întrefier constant neuniform al motorului;
- **Excentricitate statică și scurtcircuit (ECC și SHC):** Toate barele au aceeași rezistivitate, rezistența la scurtcircuit are valoarea  $R_{SHC} = 9 \text{ [}\Omega\text{]}$  și un întrefier constant neuniform al motorului;
- **Scurtcircuit, o bară întreruptă și excentricitate statică (SHC &BB &ECC):** Toate barele au aceeași rezistivitate, cu excepția uneia care are  $10^7$  mai mare, rezistența la scurtcircuit are valoarea  $R_{SHC} = 9 \text{ [}\Omega\text{]}$  și un întrefier constant neuniform al motorului.

În timpul procesului de întrerupere al barei, valoarea curentului prin bară scade, același efect putând fi obținut și prin creșterea rezistivității barei.

Fig. 2.5 prezintă colivia de veveriță cu bara care va fi întreruptă.

Excentricitatea statică apare atunci când linia centrală a rotorului se află la un decalaj constant de 0,1 mm, față de centrul statorului, ceea ce conduce la un întrefier constant neuniform, Fig. 2.6.

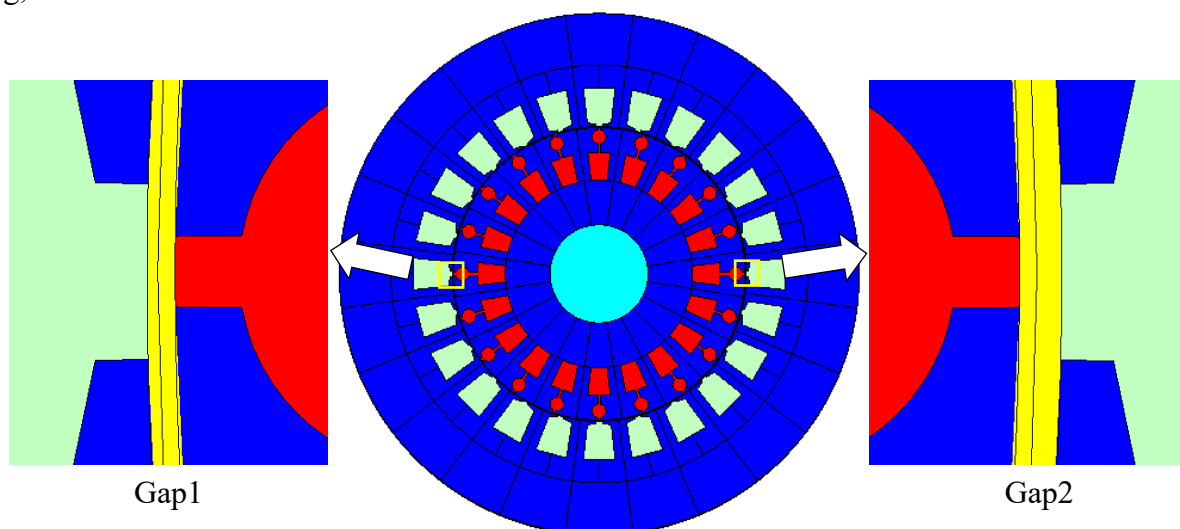


Fig. 2.6. Excentricitate statică, Gap1 = 0,4 mm și Gap2 = 0,6 mm

### 2.3. Formularea câmpului electromagnetic 3D în motoarele asincrone

Elementul finit (FE) în analiza domeniului temporal al motoarelor cu inducție în colivie de veveriță utilizează formularea scalară a câmpului electromagnetic:

- a) Regiuni de tip conductor solid: potențial vectorial electric  $\mathbf{T}$  și potențial scalar magnetic  $\Phi$ :

$$\text{curl} \left[ \frac{1}{\sigma} \text{curl} \mathbf{T} \right] + \left[ \mathbf{T} \frac{\partial}{\partial t} - \text{grad} \mu \right] / \Phi t = 0 \quad (2.1)$$

$$\text{div}[\mu(\mathbf{T} - \text{grad} \Phi)] = 0 \text{ și } \text{div} \mathbf{T} = 0 \quad (2.2)$$

Densitatea curentului și intensitatea câmpului magnetic:  $\mathbf{J} = \text{curbare } \mathbf{T}$ ,  $\mathbf{H} = \mathbf{T} - \text{grad} \Phi$

- b) Regiuni magnetice și neconductoare: potențial scalar magnetic  $\Phi$

$$\text{div}[\mu \text{grad} \Phi] = 0 \quad (2.3)$$

Intensitatea câmpului magnetic este  $\mathbf{H} = -\text{grad} \Phi$

- c) Regiuni neconductoare și nemagnetice: potențial scalar magnetic redus  $\Phi_r$

$$\text{div}[\mu_0(\mathbf{H}_0 - \text{grad} \Phi_r)] = 0, \quad (2.4)$$

unde  $\mathbf{H}_0$  - câmpul magnetic sursă din spațiul liber infinit extins, asociat densității curentului  $\mathbf{J}_1$  în volumul  $V$  este dat de formula Biot-Savart:

$$\mathbf{H}_0 = \frac{1}{4\pi} \iiint_V \frac{\mathbf{J}_1 \times \mathbf{r}}{r^3} dV \quad (2.5)$$

Intensitatea câmpului magnetic este  $\mathbf{H} = \mathbf{H}_0 - \text{grad} \Phi_r$

### 2.4. Analiza pas cu pas în domeniul timpului cu elemente finite

Analiza domeniului temporal al elementului finit al cuplului electromagnetic, aferentă forței electromagnetice unilaterale asupra rotorului, curenților de fază și câmpului electromagnetic din interiorul și exteriorul motorului asincron, pentru valori cunoscute ale tensiunii de alimentare a motorului (3 x 380 V), frecvența (50 Hz) și pentru viteza impusă a rotorului, are în vedere: **2 ms**



pas de timp pentru **analiza de joasa frecvență (LF)**. Această valoare asigură o precizie acceptabilă a calculului pas cu pas în domeniul timpului a forței de dezechilibrare a cuplului și rotorului, respectiv a armonicilor acestora până la 75 Hz. Sunt calculate armonicile în domeniul [2 ... 74] Hz cu un pas de 2 Hz; **Pas de timp de 0,05 ms** pentru **analiza de înaltă frecvență (HF)**. Aceasta asigură o precizie acceptabilă a calculului pas cu pas în domeniul temporal al diferitelor cantități, respectiv al armonicilor lor până la 1500 Hz. Sunt calculate armonicile din interval [75 ... 1500/2000] Hz, cu pas de 25 Hz.

### CAPITOLUL 3 INFLUENȚA DEFECTELOR ASUPRA CUPLULUI ELECTROMAGNETIC

Primul pas este de a vedea și analiza influența defectelor individuale și a combinației lor asupra cuplului electromagnetic în funcționarea motorului cu sarcină nominală (2880 rpm). În acest capitol sunt prezentate rezultatele obținute. Unele rezultate din acest capitol au fost publicate la [110].

#### 3.1. Comparație între defectele scurtcircuit, bară întreruptă, excentricitate și starea sănătoasă

Tabelul 3.1 prezintă rezultatele referitoare la valorile medii ale cuplului și variația în raport cu valorile medii HE iar Tabelul 3.2 prezintă primele trei armonici ale cuplului, în ordinea descrescătoare a amplitudinii

Tabelul 3.1 Valorile medii ale cuplului și variația în raport cu valorile medii ale HE

SHC [Nm]	$(23.44 + 23.06)/2 = 23.25$
BB [Nm]	$(15.67 + 16.07)/2 = 15.87$
ECC [Nm]	$(23.24 + 22.89)/2 = 23.065$
HE [Nm]	$(23.46 + 23.12)/2 = 23.29$
SHC/HE [%]	99.8
BB/HE [%]	68.1
ECC/HE [%]	99.03

Defectul BB are cea mai importantă influență asupra valorii medii a cuplului rotorului, iar defectul SHC are cea mai slabă influență. Scăderea valorii medii a cuplului este foarte importantă în cazul defectului BB, în jur de 32 %. Această scădere este neglijabilă în cazul defectelor SHC și ECC.

Aceași armonică a cuplului există cu frecvența 850 Hz, care are cea mai mare valoare a amplitudinii în stările SHC, ECC și HE.

În starea de defect BB, armonica de 4 Hz prezintă valoare a amplitudinii cea mai mare.

Tabelul 3.2 Primele trei armonici ale cuplului în ordinea descrescătoare a amplitudinii

	SHC			BB			ECC			EL		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Amplitudine [nm]	2.04	1.41	1.08	1.44	1.32	0.93	1.90	1.27	1.14	1.89	1.28	1.07
f [Hz]	850	875	1150	4	850	875	850	875	1150	850	875	1150

Grupe de frecvență: {850 Hz, 875 Hz, 1150 Hz}, 4 Hz

Armonica de 4 Hz este specifică numai pentru defectul BB.

Armonicile de fantă de 850 Hz și 875 Hz sunt prezente în toate cazurile HE, SHC, BB și ECC. Cu aceste armonici, niciunul dintre cele trei defecte nu pot fi detectat, deoarece acestea sunt prezente și în starea sănătoasă a motorului.

### 3.2. Analiza stărilor duble de defect

#### 3.2.1. Comparație între defectul de scurtcircuit dublu cu bara întreruptă, defectul de scurtcircuit singular cu bara întreruptă și starea sănătoasă

Valoarea medie a cuplului în starea de dublu defect SHC&BB este cu 31,91 % mai mică decât cea în starea de defect SHC, dar diferența dintre valorile cuplului mediu în starea de dublu defect SHC&BB și starea de defect BB este neglijabilă.

Armonica cuplului cu cea mai mare valoare a amplitudinii, 1,44 Nm, în starea de dublu defect SHC&BB cu frecvența 4 Hz este diferită de armonica similară în starea de defect SHC, cu frecvența 850 Hz și amplitudinea 2,04 Nm. Cea mai importantă armonică din dublul defect SHC&BB are aceeași frecvență și amplitudine ca și în starea de defect BB.

Dacă defectul BB este suprapus peste defectul SHC, valoarea medie a cuplului și amplitudinea celei mai importante armonici de 4 Hz sunt practic aceleași ca și în cazul defectului BB.

Ponderea BB individual în SHC&BB cu dublu defect este de 99,75 %, iar factorul de pondere al SHC individual în SHC&BB cu dublu defect, de 68,09 %, este mai mic.

Figurile 3.1, 3.2 și 3.3 prezintă amplitudinile armonicilor cuplului LF&HF, stările SHC&BB, SHC și BB,

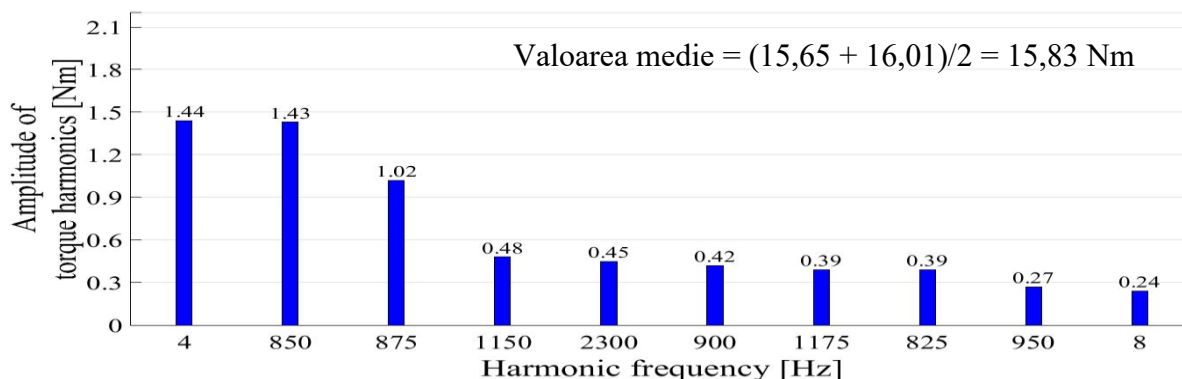


Fig. 3.1. Amplitudinile cuplului armonicilor LF&HF, starea SHC&BB

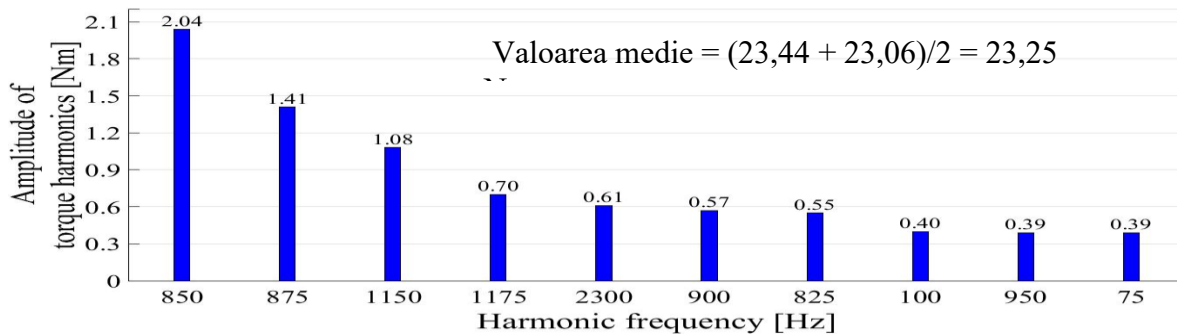


Fig. 3.2. Amplitudinile cuplului armonicilor LF&HF, starea SHC



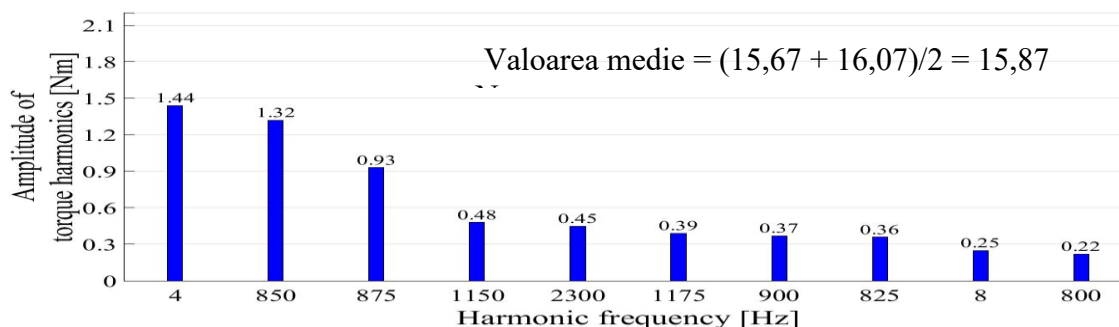


Fig. 3.3. Amplitudinile cuplului armonici LF&HF, starea BB

### 3.2.2. Comparație între bara întreruptă cu defect dublu și excentricitate, bara întreruptă individual și excentricitate și starea sănătoasă

Valoarea medie a cuplului în starea de dublu defect BB&ECC este practic aceeași ca și în starea de defect BB. Această valoare este cu 31,65 % mai mică decât în starea de defect ECC.

Armonica cuplului cu cea mai mare valoare a amplitudinii, 1,62 Nm, în starea de dublu defect BB&ECC are frecvența 4 Hz, la fel ca în starea de defect BB. Această amplitudine este  $(1,62 - 1,44)/1,44 = 12,5\%$  mai mare decât în defectul BB și  $(1,90 - 1,62)/1,90 = 14,74\%$  mai mică decât în defectul ECC.

Dacă defectul ECC este suprapus peste defectul BB, valoarea medie a cuplului practic nu se modifică, dar amplitudinea celei mai importante armonici de 4 Hz crește cu 12,5%.

Ponderea BB individual în cazul BB&ECC cu dublu defect este de 99,75 %, iar factorul de pondere al ECC individual în cazul BB&ECC cu dublu defect, este mai mic de 68,09 %.

### 3.2.3. Comparație între excentricitatea cu defect dublu și excentricitatea individual, scurtcircuit și starea sănătoasă

Valoarea medie a cuplului în starea de dublu defect ECC&SHC este cu 1,13 % mai mare decât valoarea pentru ECC. Diferența dintre valorile ECC&SHC și SHC este practic neglijabilă.

Armonica cuplului cu cea mai mare valoare a amplitudinii, 2,05 Nm, în starea de dublu defect ECC&SHC are frecvența 850 Hz, la fel ca în ECC individual și în SHC individual. Amplitudinea armonicii de 850 Hz este  $(2,05 - 1,90)/1,90 = 7,9\%$  mai mare în defectul dublu ECC&SHC decât în defectul ECC. Amplitudinea acestei armonici este practic aceeași în cazurile ECC&SHC și SHC.

Dacă defectul SHC este suprapus peste defectul ECC, valoarea medie a cuplului și amplitudinea celei mai importante armonice de 850 Hz cresc ușor.

Ponderile ECC și SHC individual în ECC și SHC cu dublu defect sunt practic aceleași.

### 3.2.4. Comparație între defectele duble scurtcircuit cu bară întreruptă, bară întreruptă și excentricitate, excentricitate și scurtcircuit, defectele individuale scurtcircuit, bară întreruptă, excentricitate și stare sănătoasă

În cele două defecte duble, SHC&BB, BB&ECC, valoarea medie a cuplului rotorului este aproape aceeași ca în BB individual, mai mică decât în ECC&SHC cu dublu defect, în SHC și ECC individual și în starea HE. Ca și în defectul SHC și în defectul ECC, valoarea medie a cuplului rotorului în defectul dublu ECC&SHC este practic aceeași ca în starea HE.

În cele două defecte duble care includ defectul BB, acest ultim defect are un factor de ponderare mai mare decât cel de-al doilea defect. În dubla eroare ECC&SHC, factorul de ponderare al celor două defecte este practic același.

Cea mai importantă armonică în defectele duble SHC&BB și BB&ECC este cea de 4 Hz, care este cea mai importantă armonică în defectul mono BB. Această armonică nu este importantă în defectul dublu ECC&SHC.

Armonicile de creștătură cu frecvența din grupul {850 Hz, 875 Hz, 1150 Hz}, au valori mai mici, dar comparabile ale amplitudinii. Trebuie subliniat că aceste armonici sunt prezente și în starea HE. Armonica de 850 Hz este cea mai importantă în defectul dublu ECC&SHC și a doua armonică importantă în defectele duble SHC&BB și BB&ECC.

### 3.3. Defectul triplu scurtcircuit și bară întreruptă și excentricitate. Comparație între defectul triplu SHC&BB&ECC, defectele individuale scurtcircuit, bară întreruptă, excentricitate și starea sănătoasă

Fig. 3.5 prezintă variația în timp a cuplului pentru starea SHC&BB&ECC iar în Fig. 3.6 și 3.7 sunt prezentate armonicile LF și HF.

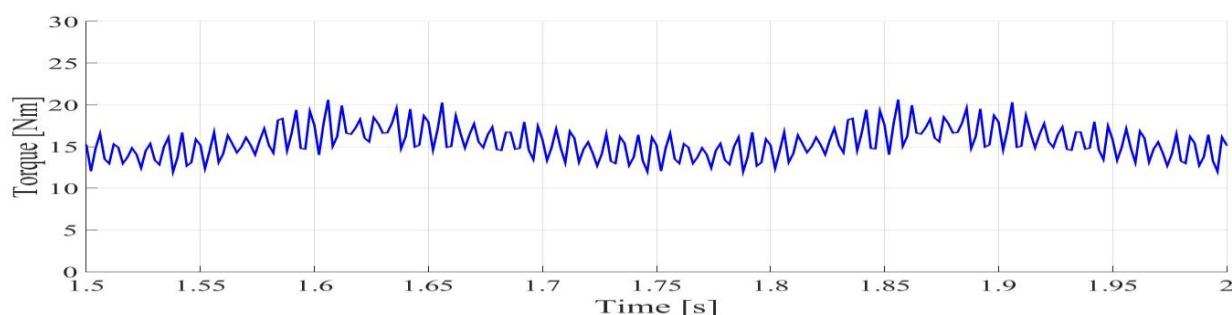


Fig. 3.4. Variația în timp a cuplului pentru stările SHC&BB&ECC. Valoarea medie LF = 15,54 Nm

În cazul celor două defecte triple SHC&BB&ECC, valoarea medie a cuplului rotorului este aproape aceeași ca în BB individual, mai mică decât în SHC și ECC individual și în starea HE.

Cea mai importantă armonică în defectul triplu SHC&BB&ECC este cea de 4 Hz, care este cea mai importantă armonică din defectul singular BB.

Armonicile de creștătură cu frecvența în grupul {850 Hz, 875 Hz}, au valori mai mici, dar comparabile ale amplitudinii. Trebuie evidențiat că aceste armonici sunt prezente și în starea HE.

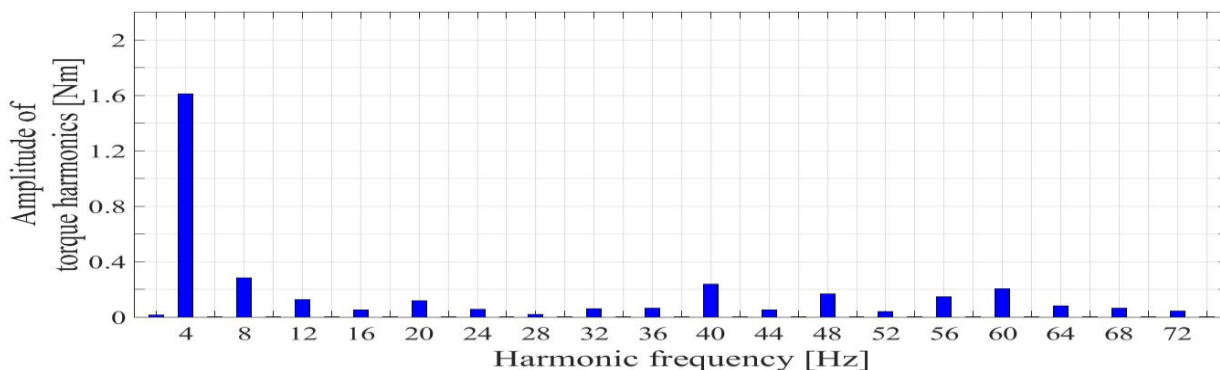


Fig. 3.5. Armonicile LF ale cuplului pentru starea SHC&BB&ECC

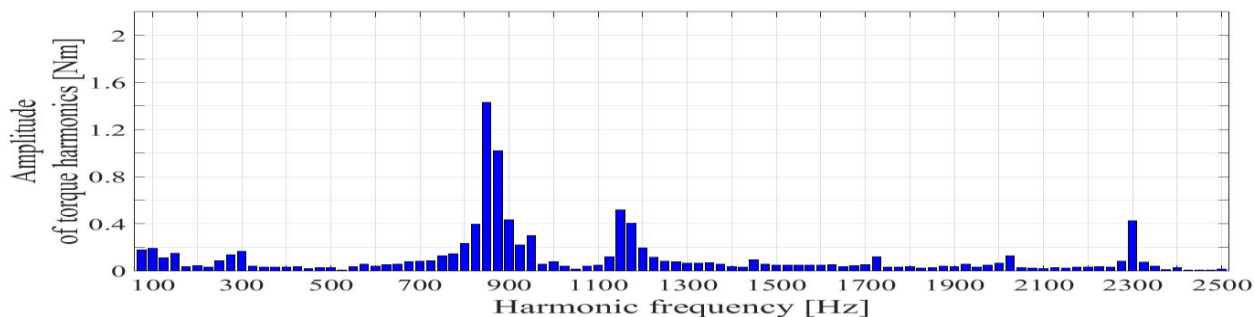


Fig. 3.6. Armonicile HF ale cuplului pentru starea SHC&BB&ECC

## CAPITOLUL 4 INFLUENȚA DEFECTELOR ASUPRA FORȚEI ELECTROMAGNETICE UNILATERALE

Influența defectelor asupra forței electromagnetice unilaterale asupra rotorului este analizată în cazul tuturor stărilor motorului la funcționarea lui fără sarcină (3000 rpm) și în sarcină (2880 rpm). O serie de rezultate din acest capitol au fost publicate la [110].

### 4.1. Funcționarea motorului în sarcină

#### 4.1.1. Comparație între defectele individuale scurtcircuit, bara întreruptă, excentricitate și starea sănătoasă

Valorile medii ale forței electromagnetice unilaterale a rotorului și rapoartele valorilor medii sunt prezentate în tabelul 4.1.

Tabelul 4.1 Valorile medii ale forței electromagnetice unilaterale și rapoartele valorilor medii

SHC [N]	$(70,87 + 70,41)/2 = 70,64$
BB [N]	$(368.4 + 383.6)/2 = 376.0$
ECC [N]	$(197,3 + 191,8)/2 = 194,55$
EL [N]	$(20,78 + 17,84)/2 = 19,31$
SHC/HE	3.660
BB/HE	19.47
ECC/HE	10.08

Ordinea influenței (superioară, medie, inferioară): BB, ECC, SHC

Valoarea medie a forței electromagnetice unilaterale asupra rotorului prezintă o creștere importantă sau foarte importantă a prezenței defectelor SHC, ECC și BB în raport cu valoarea din starea HE. În ordine, această creștere este de 3, 66 ori, 10, 08 ori și 19, 47 ori.

Ordinea importanței armonicilor forței electromagnetice unilaterale asupra rotorului reflectată în tabelul următor este de 4 Hz, grupul {40 Hz, 60 Hz} în jurul frecvenței de alimentare 50 Hz, frecvențele de creștătură {1050 Hz, 950 Hz, 1150 Hz} și grupul {100 Hz, 200 Hz, 300 Hz} multipli de 50 Hz.

Tabelul 4.2 Primele trei armonici ale forței electromagnetice unilaterale în ordine descrescătoare

	SHC			BB			ECC			EL		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Amplitudine [N]	26.8	25.8	25.5	97.0	23.6	14.2	66.2	49.3	43.7	3.70	3.54	2.14
f [Hz]	200	950	40	4	300	8	60	1050	100	4	1150	8

Grupe de frecvență: 4 Hz, {60 Hz, 40 Hz}, {1050 Hz, 950 Hz, 1150 Hz}, {100 Hz, 200 Hz, 300 Hz}

Tabelul 4.3 Primele trei armonici ale forței electromagnetice unilaterale în ordine descrescătoare

	SHC			BB			ECC			EL		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
[%]	37.94	36.52	36.10	25.80	6.277	3.777	34.03	25.34	22.46	19.16	18.33	11.08
f [Hz]	200	950	40	4	300	8	60	1050	100	4	1150	8

#### 4.1.2. Analiza stărilor de defect dublu

4.1.2.1. *Comparație între defectul dublu scurtcircuit și bară întreruptă, defectele individuale scurtcircuit și bară întreruptă și starea sănătoasă*

În defectul dublu SHC&BB, armonica forței electromagnetice unilaterale cu cea mai mare amplitudine 86,9 N are frecvența 4 Hz. Aceeași armonică în starea BB are amplitudinea 97,0 N. Următoarele două armonici importante din defectul dublu SHC&BB, 150 Hz / 52,3 N și 48 Hz / 49,0 N nu sunt importante în starea de defect BB.

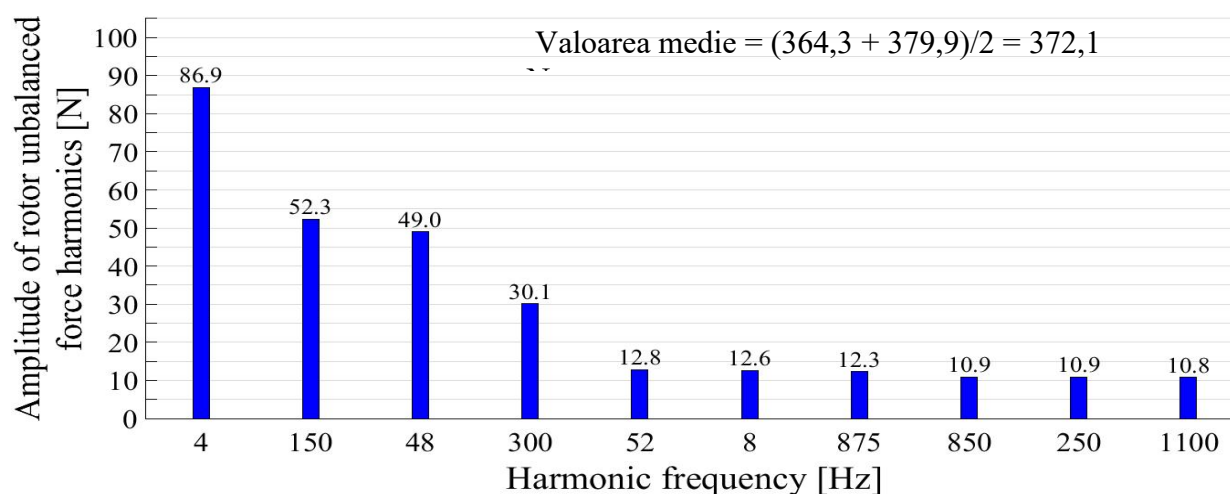


Fig. 4.1. Amplitudinile armonicilor forței electromagnetice unilaterale, starea de defect SHC și BB

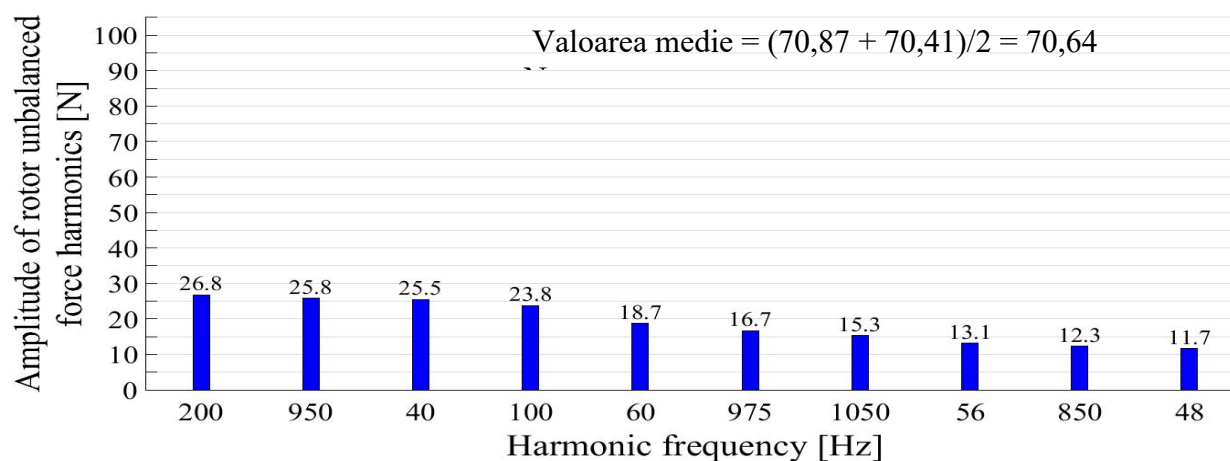


Fig. 4.2. Amplitudinile armonicilor forței electromagnetice unilaterale, starea de defect SHC

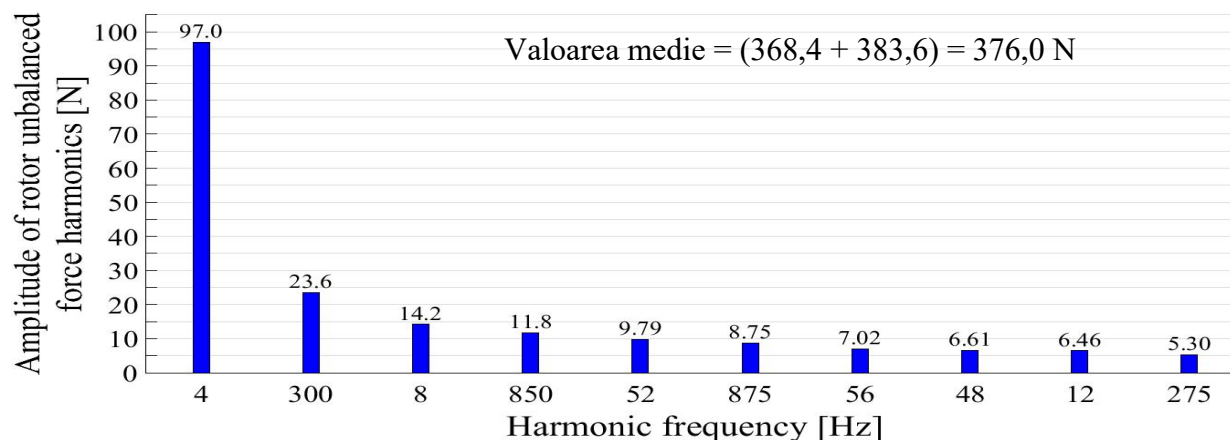


Fig. 4.3. Amplitudinile armonicilor forței electromagnetice unilaterale, starea BB

Dacă defectul BB este suprapus peste defectul SHC, valoarea medie a forței electromagnetice unilaterale asupra rotorului crește drastic, de 5,267 ori, iar cele mai importante armonici sunt diferite. Prima armonică importantă are aceeași frecvență 4 Hz și amplitudinea puțin mai mică decât cea mai importantă armonică din starea de defect BB.

Impactul BB individual în defectul dublu SHC &BB, 101,05 %, este mult mai mare decât impactul defectului SHC, care este de numai 18,98 %.

#### 4.1.2.2. *Comparație între defectul dublu bara întreruptă și excentricitate, defectele individuale bara întreruptă și excentricitate și starea sănătoasă*

Valoarea medie a forței electromagnetice unilaterale asupra rotorului în starea BB&ECC este cu 1,5% mai mare decât cea din starea BB și cu 95% mai mare decât cea din starea ECC.

Valoarea medie a forței electromagnetice unilaterale asupra rotorului în starea de dublu defect BB&ECC este puțin mai mare decât în starea de defect BB și  $387,05 \text{ N} / 194,55 \text{ N} =$  de 1,989 ori mai mare decât în starea de defect ECC.

În defectul dublu BB&ECC, armonică forței electromagnetice unilaterale asupra rotorului cu cea mai mare amplitudine 149 N are frecvența 48 Hz. Această armonică nu este importantă în stările de defect BB și ECC.

A doua armonică importantă din defectul dublu BB&ECC, 4 Hz / 105 N, are o amplitudine puțin mai mare decât armonică similară 4 Hz / 97 N în starea de defect BB.

Dacă defectul ECC este suprapus peste defectul BB, valoarea medie a forței electromagnetice unilaterale asupra rotorului crește ușor, de la 376,0 N la 387,05 N. O nouă armonică, cea mai importantă, 48 Hz / 149 N, înlocuiește prima armonică importantă de 4 Hz în starea de defect BB. Armonică de 4 Hz devine a doua armonică importantă din dublul defect BB&ECC

Impactul BB individual în dublul defect BB&ECC, 97,1 %, este mai mare decât impactul defectului ECC, care este de 50,3 %.

#### 4.1.2.3. *Comparație între defectul dublu excentricitate și scurtcircuit, defectele individuale excentricitate, scurtcircuit și starea sănătoasă*

Valoarea medie a forței electromagnetice unilaterale asupra rotorului în starea de dublu defect ECC&SHC, 170,3 N, este mai mică decât în starea de defect ECC, 195,55 N și  $170,2 \text{ N} / 70,64 \text{ N} =$  de 2,409 ori mai mare decât în starea de defect SHC.

În defectul dublu ECC&SHC, armonica forței de dezechilibrare asupra rotorului cu cea mai mare amplitudine 87,8 N are frecvența de 100 Hz. Această armonică are cele mai mici valori în starea de defect ECC, 43,7 N și 23,8 N în starea de defect SHC.

A doua armonică importantă din defectul dublu ECC&SHC, 60 Hz / 77,4 N, are o amplitudine puțin mai mare decât armonica similară și cea mai importantă 60 Hz / 66,2 N în starea de defect ECC.

Dacă defectul SHC este suprapus peste defectul ECC, valoarea medie a forței electromagnetice unilaterale asupra rotorului scade de la 194,55 N la 170,3 N. O nouă armonică cea mai importantă, 100 Hz / 87,8 N, înlocuiește prima armonică importantă, 60 Hz / 66,2 N în starea de defect ECC. Armonica de 60 Hz, cu creșteri de amplitudine la 77,4 N, devine a doua armonică importantă în starea de dublu defect ECC&SHC.

Impactul ECC individual în defectul dublu ECC&SHC, 114,24 %, este mai mare decât impactul defectului SHC, care este de 41,48 %.

*4.1.2.4. Compararea defectelor duble scurtcircuit și bară întrerupte, bară întreruptă și excentricitate, excentricitate și scurtcircuit, defectelor individuale de scurtcircuit, barei întrerupte, excentricitate și a stării sănătoase*

În cele două defecte duble SHC&BB, BB&ECC, valoarea medie a forței electromagnetice unilaterale asupra rotorului este aproape aceeași ca în BB individual, mai mare decât în defectul dublu ECC&SHC, în defectele unice SHC și ECC și în starea HE. Forța electromagnetică unilaterală asupra rotorului în falia dublă ECC&SHC, 170,3 N, este puțin mai mică de 194,55 N în falia ECC și mai mare de 70,64 N în defectul SHC.

Toate forțele din stările cu dublă falie SHC&BB, BB&ECC și ECC&SHC sunt mult mai mari decât în starea HE. Aceste forțe sunt, de asemenea, mai mult sau mai puțin mai mari decât în stările cu o singură falie SHC, BB și ECC.

Impactul defectului BB este cu atât mai important în defectul BB&ECC comparativ cu impactul defectului ECC, sunt mult mai importante în defectul SHC&BB.

Cea mai importanta armonică a forței electromagnetice unilaterale asupra rotorului în defectul dublu SHC&BB este cea de 4 Hz, care este cea mai importanta armonică în defectul mono BB. A doua armonică importantă în defectul BB&ECC, cu frecvența 4 Hz, are amplitudinea mai mare decât în defectul SHC&BB.

Cea mai importantă armonică a forței electromagnetice unilaterale asupra rotorului în dublul defect BB&ECC are frecvența 48 Hz, care aparține unui grup de frecvențe în jurul frecvenței de alimentare 50 Hz. Aceluiași grup îi aparțin a doua armonică importantă 60 Hz / 77,4 N a defectului ECC&SHC și a treia armonică importantă 48 Hz / 49,0 N a defectului SHC&BB.

Cea mai importantă armonică a forței electromagnetice unilaterale asupra rotorului în dublul defect ECC&SHC, 100 Hz / 87,8 N și a doua armonică importantă a defectului SHC&BB aparțin unui grup de frecvențe multiplu de 50 Hz.

Există, de asemenea, armonici de creștătură, 1100 Hz / 46,1 N în defectul BB&ECC și 1050 Hz / 53,4 N în defectul ECC&SHC.

### **4.1.3. Analiza defectului triplu scurtcircuit și bară întreruptă și excentricitate**

Fig. 4.4 prezintă variațiile de timp ale forței electromagnetice unilaterale asupra rotorului, starea SHC&BB&ECC. Valoarea medie  $LF = 363,5$  N. Armonicele amplitudinilor forței electromagnetice unilaterale asupra rotorului sunt prezentate în figurile 4.5 și 4.6 pentru LF și HF.

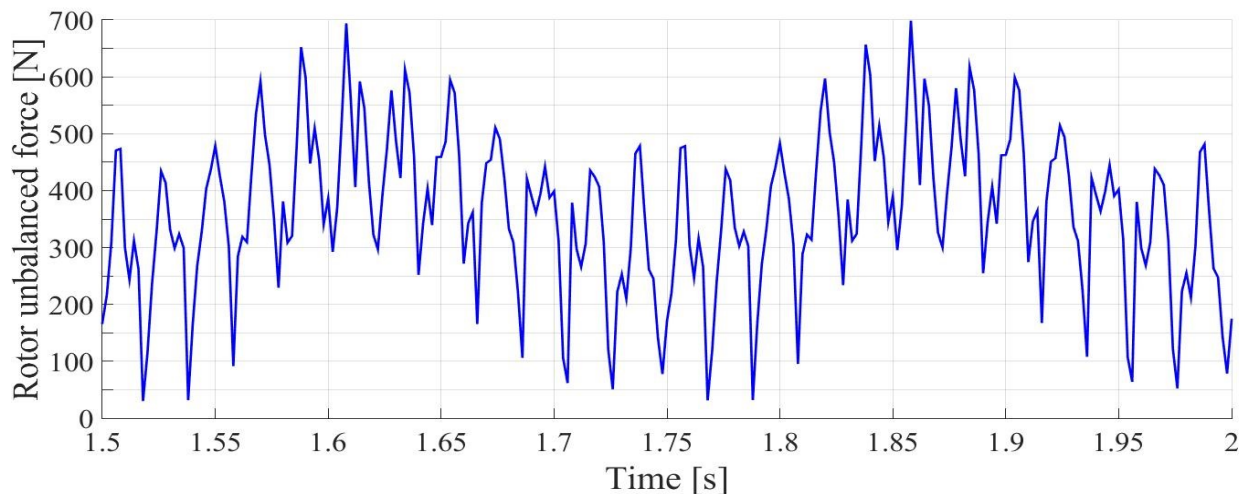


Fig. 4.4. Variația în timp a forței electromagnetice unilaterale asupra rotorului, starea SHC&BB&ECC.

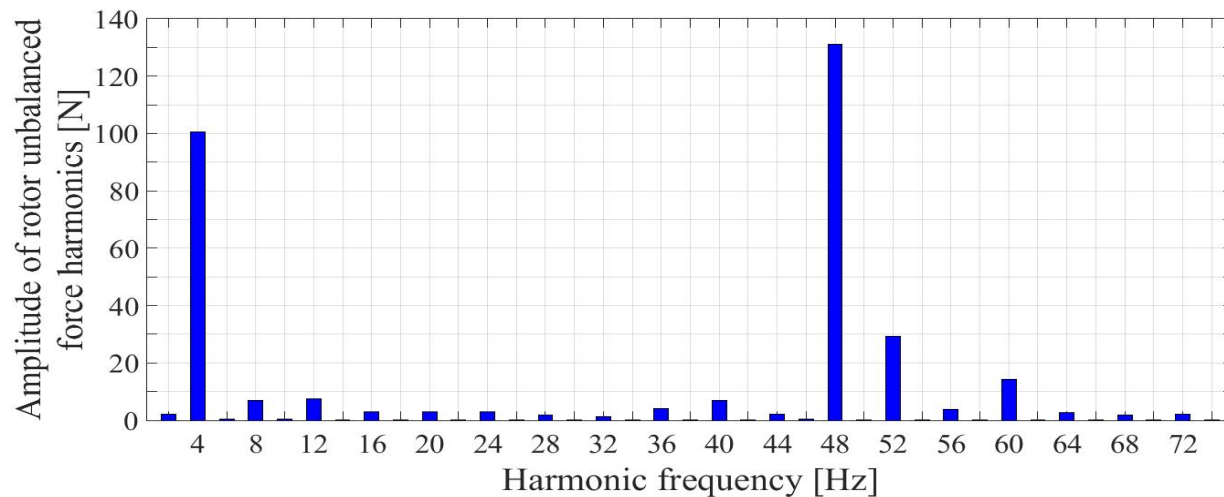


Fig. 4.5. Armonicile LF ale forței electromagnetice unilaterale asupra rotorului, starea SHC&BB&ECC

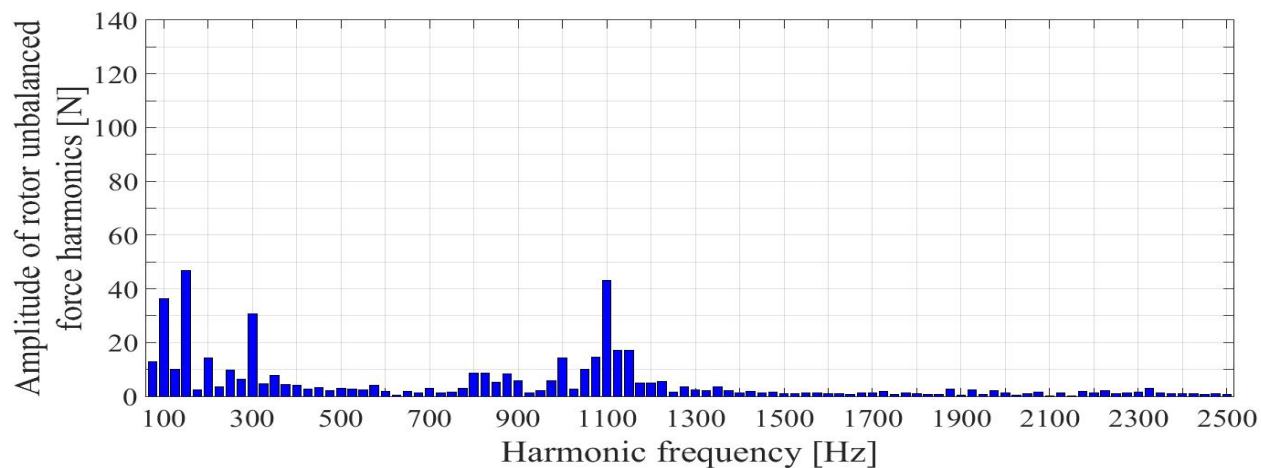


Fig. 4.6. Armonicile HF ale forței electromagnetice unilaterale asupra rotorului, starea SHC&BB&ECC



### **4.2.3. Comparație între defectul triplu scurtcircuit și bară întreruptă și excentricitate, defectele individuale scurtcircuit, bară întreruptă, excentricitate și starea sănătoasă**

În defectul triplu SHC&BB&ECC valoarea medie a forței electromagnetice unilaterale asupra rotorului este aproape aceeași ca în BB individual, mai mare decât în ECC și SHC cu o defect individual și mult mai mare decât în starea HE.

Impactul defectului BB este mai important în defectul triplu SHC&BB&ECC comparativ cu defectele ECC și SHC.

Armonicele 48 Hz / 131 N și 4 Hz / 101 N sunt primele două armonici importante ale forței electromagnetice unilaterale asupra rotorului în defectul triplu SHC&BB&ECC. Amplitudinile următoarelor două armonici în ordinea importanței, 150 Hz / 46,7 N și 1100 Hz / 43,1 N, nu sunt mult mai mici.

## **4.2. Funcționarea fără sarcină a motorului**

### **4.2.1. Comparație între defectele individuale de scurtcircuit, bara întreruptă, excentricitate și starea sănătoasă**

Valoarea medie a forței electromagnetice unilaterale asupra rotorului prezintă o creștere scăzută, importantă și foarte importantă a prezentei defectelor BB, SHC și ECC în raport cu valoarea din starea HE. În ordine, această creștere este de 1,375 ori, de 11,39 ori și de 19,10 ori.

Ordinea importanței armonicilor forței electromagnetice unilaterale asupra rotorului reflectată în tabelul următor este grupa {100 Hz, 200 Hz, 300 Hz, 600 Hz} multiplu de 50 Hz, frecvențele de crestătură {1100 Hz, 1200 Hz, 900 Hz } și 56 Hz în jurul frecvenței de alimentare 50 Hz.

### **4.2.2. Analiza stărilor defect dublu**

#### *4.2.2.1. Comparație între defectul dublu de scurtcircuit și bară întreruptă, defectele individuale scurtcircuit și bară întreruptă și starea sănătoasă*

Valoarea medie a forței electromagnetice unilaterale asupra rotorului în starea de dublu defect SHC&BB este de  $75,04/8,559 =$  de 8,767 ori mai mare decât în starea BB și ușor mai mare decât în starea de defect SHC, 5,809%.

În defectul dublu SHC&BB, armonica forței de dezechilibrare asupra rotorului cu cea mai mare amplitudine 35,4 N are frecvența 100 Hz. Aceeași armonică în starea SHC are amplitudinea 37,5 N. Următoarele armonici importante din defectul dublu SHC&BB este de 200 Hz / 19,1 N, nu sunt importante în starea de defect BB.

Dacă defectul BB este suprapus peste defectul SHC, valoarea medie a forței electromagnetice unilaterale asupra rotorului crește ușor cu 5,809%, iar cele mai importante armonice rămân aceleași.

Impactul SHC individual în defectul dublu SHC&BB, 94,51 %, este mult mai mare decât impactul defectului BB, care este de numai 11,41 %.

#### *4.2.2.2. Comparație între defectul dublu bară întreruptă și excentricitate, defecte individuale bara întreruptă și excentricitate și starea sănătoasă*

Valoarea medie a forței electromagnetice unilaterale asupra rotorului în starea de dublu defect BB&ECC este puțin mai mare decât în starea de defect ECC și  $123,0 \text{ N} / 8,559 \text{ N} =$  de 14,37 ori mai mare decât în starea de defect BB.

În dublul defect BB&ECC armonica forței electromagnetice unilaterale asupra rotorului cu cea mai mare amplitudine 26,9 N are frecvența 1100 Hz. Această armonică este importantă în defectul ECC.



A doua armonică importantă din defectul dublu BB&ECC, 100 Hz / 23,1 N, are o amplitudine puțin mai mare decât armonica similară 100 Hz / 21,0 N în starea de defect ECC.

Dacă defectul ECC este suprapus peste defectul BB, valoarea medie a forței electromagnetice unilaterale asupra rotorului crește foarte mult, de la 8,559 N la 123,0 N. O nouă armonică, cea mai importantă, 1100 Hz / 26,9 N, înlocuiește prima armonică importantă de 300 Hz în starea de defect BB. Armonica de 300 Hz nu este una dintre cele mai importante armonice din dublul defect BB&ECC.

Impactul ECC individual în defectul dublu BB&ECC, 96,67%, este mult mai mare decât impactul defectului BB, care este de 6,959%.

#### *4.2.3.3. Comparație între defectul dublu excentricitate și scurtcircuit, defectele individuale excentricitate și scurtcircuit și starea sănătoasă*

Valoarea medie a forței electromagnetice unilaterale asupra rotorului în starea de dublu defect ECC&SHC, 93,13 N, este mai mică decât în starea de defect ECC, 118,9 N și 93,13 N / 70,92 N = de 1,313 ori mai mare decât în starea de defect SHC.

În defectul dublu ECC&SHC, armonica forței de dezechilibrare asupra rotorului cu cea mai mare amplitudine 40,3 N are frecvența de 100 Hz. Această armonică are 21,0 N în starea de defect ECC și 37,5 N în starea de defect SHC.

A doua armonică importantă în defectul dublu ECC&SHC, 1100 Hz / 15,7 N, are o amplitudine mai mică decât armonica similară și cea mai importantă 1100 Hz / 26,9 N în starea de defect ECC și amplitudine mai mare, 1100 Hz / 11,9 N în defectul SHC.

Dacă defectul SHC este suprapus peste defectul ECC, valoarea medie a forței electromagnetice unilaterale asupra rotorului scade de la 118,9 N la 93,13 N. O nouă armonică cea mai importantă, 100 Hz / 40,3 N, înlocuiește prima armonică importantă, 1100 Hz / 26,9 N în starea de defect ECC. Armonica de 1100 Hz, cu o amplitudine care scade la 15,7 N, devine a doua armonică importantă în starea de dublu defect ECC&SHC.

Dacă defectul ECC este suprapus peste defectul SHC, valoarea medie a forței electromagnetice unilaterale asupra rotorului crește de la 70,92 N la 93,13 N. Cea mai importantă armonică, 100 Hz / 40,3 N, are o amplitudine ușor mai mare, 37,5 N în SHC. Armonica de 1100 Hz, cu o amplitudine care crește la 15,7 N, devine a doua armonică importantă în starea de dublu defect ECC&SHC.

Impactul ECC individual în defect dublu ECC&SHC, 127,7 %, este mai mare decât impactul defectului SHC, care este de 76,15 %.

#### *4.2.3.4. Compararea defectelor duble scurtcircuitului și bară întreruptă, bară întreruptă și excentricitate, excentricitate și scurtcircuit, a defectelor individuale de scurtcircuit, bară întreruptă, excentricității și a stării sănătoase*

În cele trei defecte duble SHC&BB, BB&ECC și ECC&SHC, valoarea medie a forței electromagnetice unilaterale asupra rotorului are valori diferite comparativ cea din stările mono.

Forța electromagnetică unilaterală asupra rotorului în defectul dublu BB&ECC, 123,0 N, este puțin mai mare de 118,9 N în defectul ECC și mult mai mare de 5,559 N în defectul BB.

Toate forțele din stările cu dublu defect SHC&BB, BB&ECC și ECC&SHC sunt mult mai mari decât în starea HE. Aceste forțe sunt, de asemenea, mai mari decât în starea BB cu defect singular.

Impactul defectului ECC este cel mai important în defectul BB&ECC comparativ cu impactul defectului BB și cel mai important în defectul ECC&SHC comparativ cu impactul defectului SHC

Impactul defectului SHC este cel mai important în defectul SHC &BB în comparație cu impactul defectului BB.

Cea mai importantă armonică a forței electromagnetice unilaterale asupra rotorului în defectul dublu SHC&BB este cea de 100 Hz, care este cea mai importantă armonică în defectul mono SHC și în defectul dubl ECC&SHC, cu o valoare a amplitudinii puțin mai mare.

A doua armonică din dublul defect SHC&BB este de 200 Hz, adică a treia armonică din defectul ECC&SHC, cu o amplitudine mai mică.

A doua armonică importantă în defectul BB&ECC, cu frecvența 100 Hz are amplitudinea mai mică decât în defectul SHC&BB.

Cea mai importantă armonică a forței electromagnetice unilaterale asupra rotorului în dublul defect BB&ECC are frecvența 1100 Hz, care aparține unui grup de frecvențe de creștătură.

A doua armonică importantă în defectul ECC&SHC, cu frecvența 1100 Hz, are amplitudinea mai mare decât în defectul SHC&BB, unde este a treia armonică, și mai mică decât cea din defectul dublu BB&ECC.

A treia armonică din defectul dublu BB&ECC este 1200 Hz, care nu este prezentă printre primele trei armonici ale celorlalte defecte duble.

#### **4.2.3. Comparație între defectul triplu de scurtcircuit și bara întreruptă și excentricitate, defectele de scurtcircuit, bară întreruptă, excentricitate și starea sănătoasă**

În triplul defect SHC&BB&ECC valoarea medie a forței electromagnetice unilaterale asupra rotorului este mai mare decât în SH cu un defect, mult mai mare decât în BB individual, mai mică decât cea din starea ECC și mult mai mare decât în starea HE.

Impactul defectului ECC este cel mai important în defectul triplu SHC&BB&ECC comparativ cu defectele SHC și BB.

Armonica 100 Hz / 40,7 N este cea mai importantă armonică a forței electromagnetice unilaterale asupra rotorului în defectul triplu SHC&BB&ECC. Amplitudinile următoarelor două armonici în ordinea importanței, 1100 Hz / 15,7 N și 200 Hz / 12,3 N, nu sunt mult mai mici.

## **CAPITOLUL 5 DETECTAREA DEFECTELOR PRIN CURENȚII STATORICI**

Acest capitol prezintă rezultatele legate de detectarea defectelor mono și multiple într-un motor cu inducție în colivie de veveriță, prin influența lor asupra armonicilor curenților statorici în timpul funcționării motorului cu sarcină (2880 rpm) și fără sarcină (3000 rpm).

Criteriul pe baza căruia se evaluează influența defectelor:

$$\text{Eficiența în detectarea defectului} = \frac{\text{valoarea amplitudinii armonici în starea cu defect}}{\text{valoarea amplitudinii armonici în starea sănătoasă}} = \frac{FA}{HE} \quad (5.1)$$

Rezultatele corespund funcționării motorului în sarcină. Unele dintre rezultate sunt prezentate în lucrarea [111].

### **5.1. Detectarea stărilor cu un defect individual în funcționarea motorului în sarcină**

În acest subcapitol este prezentată influența stărilor mono-defect asupra curenților statorului.

Figurile 5.1, 5.2 și 5.3 prezintă variația de timp a curenților de fază pentru starea cu defect unic și cea sănătoasă. Există o diferență vizibilă a variației de timp a curenților în starea BB față de celelalte stări pentru toți curenții și o mică diferență în cazul stării SHC din stările ECC și HE numai pentru curentul UI, bobina scurtcircuitată fiind pe faza U.

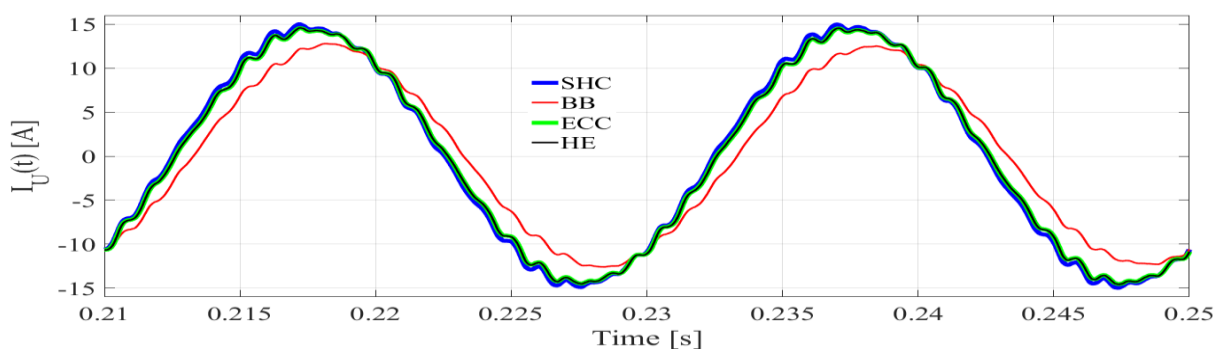


Fig. 5.1. Variația în timp a curentului  $I_U$  în stările SHC, BB, ECC și HE, funcționare în sarcină

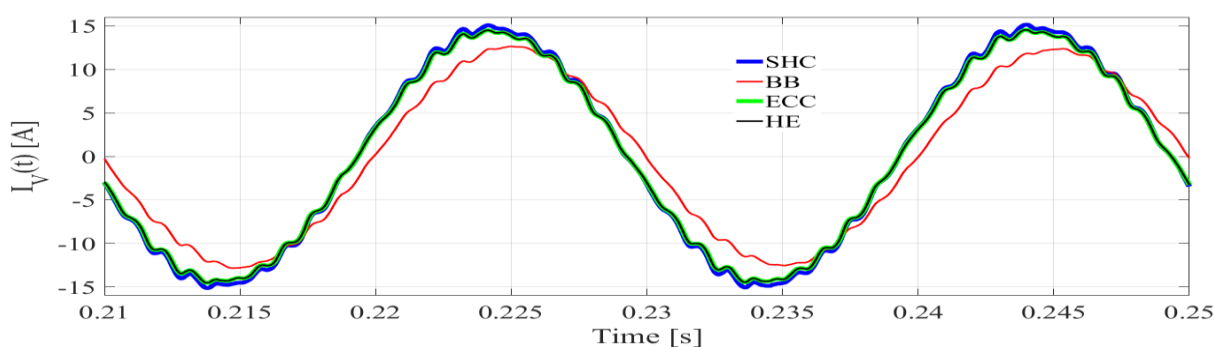


Fig. 5.2. Variația de timp a curentului  $I_V$  în stările SHC, BB, ECC și HE, funcționare în sarcină

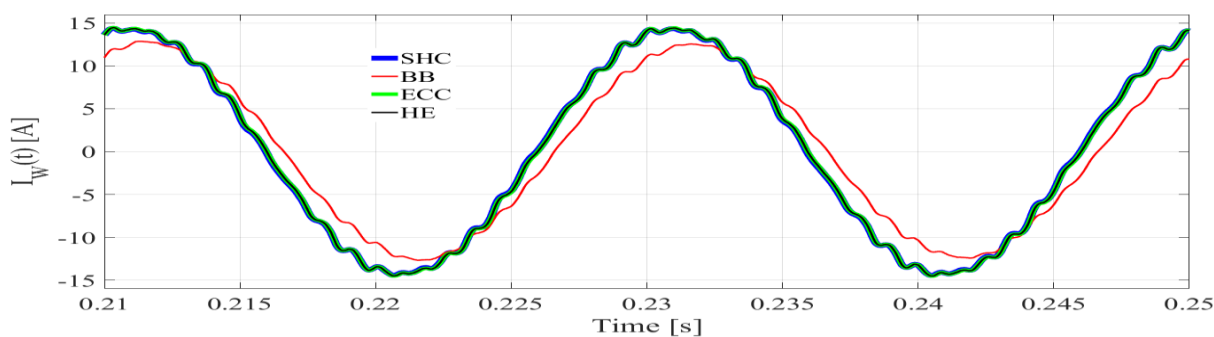


Fig. 5.3. Variația de timp a curentului  $I_W$  în stările SHC, BB, ECC și HE, funcționare în sarcină

Tabelul 5.1 prezintă informații despre curenții statorici în stările cu defecte individuale și starea HE. Informațiile prezentate sunt RMS, valorile medii și dezechilibrul curenților de fază, curent dezechilibrat.

$$\text{Valoarea medie a curenților pe cele trei faze este: } I_m = \frac{I_U + I_V + I_W}{3} \quad (5.2)$$

Dezechilibrul curentului este calculat în termeni de abatere maximă a curentului pe o fază de la valoarea medie a curenților celor trei faze.

Formula utilizată pentru calcularea abaterii procentuale este:

$$\frac{\text{Max}(|I_m - I_U|, |I_m - I_V|, |I_m - I_W|)}{I_m} \times 100 \quad (5.3)$$

În starea SHC dezechilibrul curenților de fază este mult mai mare decât cel din starea HE. Valoarea rms a curenților este mai mică în caz de defect BB și aproape aceeași cu cea din HE atunci când este prezent defectul ECC.

Tabelul 5.1 Informații despre curenții trifazați din stările SHC, BB, ECC și HE, în sarcină

Stat	UI [A]	IV [A]	IW [A]	Im [A]	Dezechilibrul actual [%]
EL	10.162	10.153	10.143	10.153	0.09521
SHC	10.373	10.502	10.119	10.331	2.0552
BB	8.8022	8.8212	8.8146	8.8127	0.1188
ECC	10.135	10.151	10.146	10.144	0.08872

Tabelul 5.2 Curenți și putere prin/în U1 și RSHC, starea SHC, funcționarea motorului în sarcină

Stat	UI1 [A]	PU1 [W]	IRSHC [A]	PRSHC [W]
SHC	9.3660	16.887	5.4755	269.83

În starea SHC, curentul  $I_{U1}$  este de 9,3660 A, mai mic decât cel din starea HE, 10,162 A, iar curentul  $I_U$ , 10,373 A, tabelele 5.1 și 5.2.

Puterea în rezistorul  $R_{SHC}$  este de 269,83 W, mult mai mare decât în bobina U1, 16,887 W, starea SHC.

### 5.1.1. Detectarea stărilor cu un defect individual prin armonici ale curențului $I_U$

Valorile eficienței în detectarea stărilor mono-defect sunt prezentate în următoarele trei figuri pentru armonicele de joasă frecvență (LF - [2 - 74] Hz) și de înaltă frecvență (HF - [75 - 750] Hz și [775 - 1500] Hz) ale curențului  $I_U$ .

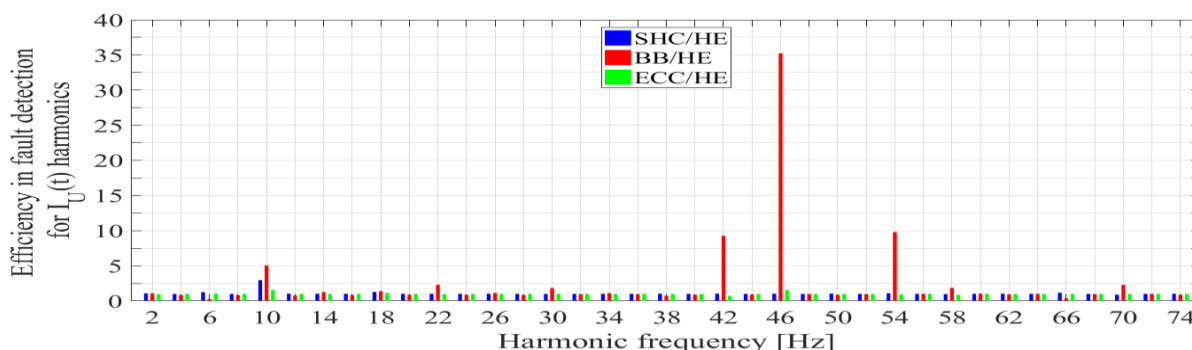


Fig. 5.4. Eficiența în detectarea stărilor SHC, BB și ECC prin armonicele curențului LF  $I_U$ , funcționare în sarcină

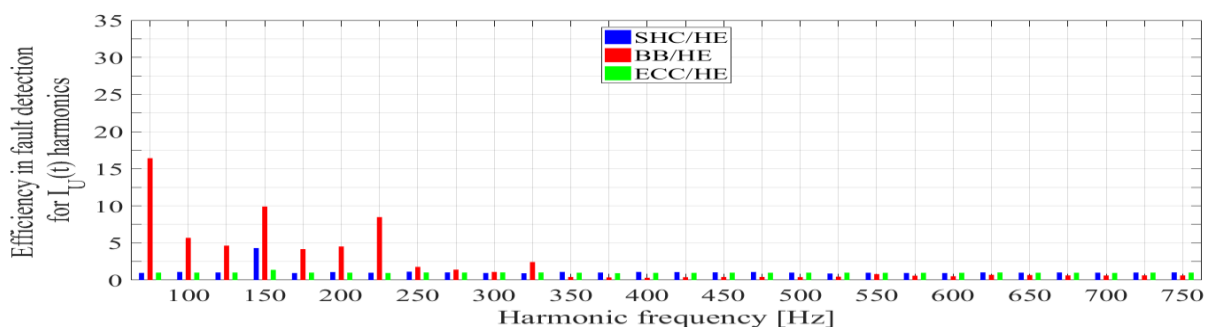


Fig. 5.5. Eficiența detectării stărilor SHC, BB și ECC prin armonici de curent HF  $I_U$  în intervalul [75 - 750] Hz, funcționare în sarcină

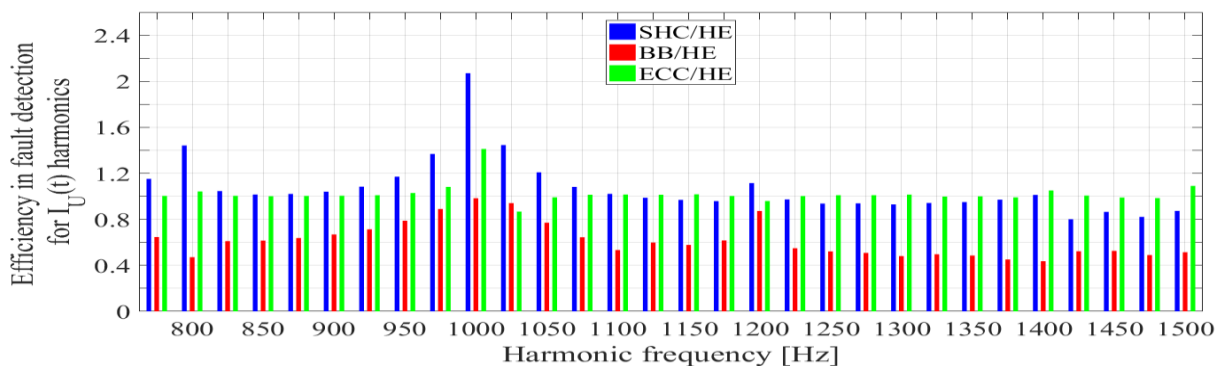


Fig. 5.6. Eficiența în detectarea stărilor SHC, BB și ECC prin armonici de curent HF  $I_U$  în intervalul [775 - 1500] Hz, funcționare în sarcină

Tabelul 5.3 evidențiază primele trei armonici cu cele mai mari valori ale eficienței în detectarea defectelor pentru curentul  $I_U$ .

Armonicile sunt grupate în funcție de tipul lor:

- armonici multiple ale frecvenței curentilor din rotor, 2 Hz;
- armonici în jurul frecvenței de alimentare, 50 Hz;
- armonici multiple al frecvenței de alimentare și multiplu de 25 Hz;
- armonice ale creștăturilor, mai mari de 500 Hz.

Tabelul 5.3 Primele trei armonici ale  $I_U$  cu cele mai mari valori ale eficienței în detectarea mono-defect, funcționarea motorului în sarcină

Stare	SHC			BB			ECC		
Ordine	1	2	3	1	2	3	1	2	3
f [Hz]	150	10	1000	46	75	150	46	10	1000
FA [mA]	11.12	16.47	33.80	492.2	72.7	25.53	22.07	8.774	23.05
EL [mA]	2.576	5.588	16.33	13.97	4.427	2.576	13.97	5.588	16.33
FA/HE	4.317	2.947	2.070	35.23	16.42	9.911	1.580	1.570	1.412

Grupe de frecvență: 10 Hz, 46 Hz, {75 Hz, 150 Hz}, 1000 Hz

Defectul ECC are cea mai mică influență asupra armonicilor curentului, iar starea BB are cea mai mare influență.

Cea mai mare valoare a eficienței, 35,23, este pentru armonica de 46 Hz în starea BB, tabelul 5.3.

În starea SHC armonica cu cea mai mare eficiență, 4,317, este de 150 Hz, diferită de cea din starea BB, în consecință defectele SHC și BB pot fi diferențiate.

În starea ECC există aceeași armonică cu cea mai mare eficiență ca și în starea BB, dar a doua armonică este diferită, 75 Hz vs. 10 Hz, în consecință defectul ECC și defectul BB pot fi diferențiate.

Prin armonicile curentului  $I_U$  poate fi detectat dacă un defect este SHC, BB sau ECC.

### 5.1.2. Detectarea stărilor cu un defect individual prin armonici ale curentului $I_V$

Figurile 5.7, 5.8 și 5.9 arată eficiența detectării unui defect prin armonicile LF și HF ale curentului  $I_V$ .

Primele trei armonici ale curentului  $I_V$  cu cele mai mari valori ale eficienței în detectarea unui singur defect sunt prezentate în tabelul următor.

Armonica de 75 Hz are cea mai mare eficiență în detectarea defectului, 30,84, în starea BB, tabelul 5.4.

În starea SHC, armonica cu cea mai mare eficiență, 14,52, este de 150 Hz, diferită de cea din starea BB, în consecință defectul SHC și BB poate fi diferențiat.

Prima armonică în stare ECC este aceeași ca în starea SHC, 150 Hz, dar a doua și a treia sunt diferite, 75 Hz și 275 Hz vs 1000 Hz și 1225 Hz, astfel încât defectul ECC și SHC pot fi diferențiate.

Prin armonicile curentului  $I_V$  pot fi detectate erorile unice SHC, BB și ECC.

### 5.1.3. Detectarea stărilor cu un defect individual prin armonici ale curentului $I_W$

Cea mai mare eficiență, 34,35, este pentru armonica de 75 Hz în starea BB, tabelul 5.5.

Armonica de 150 Hz are cea mai mare eficiență în detectarea defectelor, 6.896, pentru starea SHC și este diferită de cea din starea BB, 75 Hz, în consecință defectele SHC și BB pot fi diferențiate.

În starea ECC cea mai mare eficiență este de 1.170 pentru armonicile de 6 Hz ale curentului  $I_W$ , care este diferită de cele din stările SHC și BB, astfel încât defectul ECC poate fi detectat.

Prin armonicile curentului  $I_W$  se poate decela dacă un defect este SHC, BB sau ECC.

## 5.2. Studiul detectării stărilor de defect dublu

Această parte prezintă studiul detectării defectului dublu pe baza armonicilor curenților de fază.

În starea SHC&BB valorile rms ale curenților de fază sunt mai mici decât în starea sănătoasă, comparativ cu starea BB, iar dezechilibrul curenților este mai mare, comparativ cu starea SHC, tabelul 5.4.

Starea BB&ECC este caracterizată prin valori rms mai mici ale curenților.

În starea ECC&SHC curentul prezintă o valoare mai mare a dezechilibrului decât în starea sănătoasă, ca în starea SHC.

Tabelul 5.4 Informații despre curenții trifazați din stările SHC&BB, BB&ECC, ECC&SHC, SHC, BB, ECC și HE, funcționarea motorului în sarcină

Stat	UI [A]	IV [A]	IW [A]	Im [A]	Dezechilibrul actual [%]
SHC&BB	8.9237	9.1518	8.7739	8.9498	2.2570
BB&ECC	8.7900	8.8258	8.8271	8.8143	0.2757
ECC și SHC	10.343	10.496	10.123	10.321	1.9153

Tabelul 5.5 Curenți și putere prin/în  $U_1$  și RSHC, SHC&BB, ECC&SHC și stările SHC, funcționarea motorului în sarcină

Stat	UII [A]	PU1 [W]	IRSHC [A]	PRSHC [W]
SHC&BB	9.1530	16.127	5.4210	264.49
ECC și SHC	9.3656	16.885	5.4504	267.37
SHC	9.3660	16.887	5.4755	269.83

Valoarea curentului  $I_{U1}$  în starea SHC&BB este de 9,1530 A, mai mică decât valorile din stările ECC&SHC și SHC.

Valorile curentului  $I_{U1}$  sunt mai mari decât curentul  $I_U$  în starea SHC&BB și mai mici decât curentul  $I_U$  în stările ECC&SHC și SHC, tabelele 5.4 și 5.5.

Puterea rezistorului  $R_{SHC}$  este de 264,49 W în starea SHC&BB, puțin mai mică decât cea din starea ECC&SHC sau SHC. Puterea în rezistorul R SHC este mult mai mare decât în bobina  $U_1$  pentru fiecare stare care prezintă defectul SHC, tabelul 5.7.

### **5.2.1. Detectarea stărilor de defect dublu prin armonici ale curentului $I_U$**

Primele două armonici ale curentului  $I_U$  sunt aceleași pentru SHC&BB și BB&ECC, dar a treia este diferită, 150 Hz și 54 Hz, în consecință cele două stări pot fi diferențiate.

În starea ECC&SHC, armonica de 150 Hz are cea mai mare valoare a eficienței, diferită de cele din stările SHC&BB și BB&ECC, prin urmare starea ECC&SHC poate fi diferențiată de celelalte defecte duble.

Primele trei armonici ale curentului  $I_U$  cu cele mai mari valori ale eficienței în detectarea defectelor pentru stările SHC&BB și BB sunt aceleași, dar valoarea eficienței în detectarea defectelor pentru armonica de 150 Hz este cu 68,5% mai mare decât cea din starea BB, în consecință cele două stări pot fi diferențiate dacă se cunoaște valoarea din starea BB.

Când defectul BB este prezent într-o stare de defect, primele două armonici bazate pe criteriul de eficiență sunt 46 Hz și 75 Hz.

În starea ECC&SHC primii trei curenți  $I_U$  sunt aceiași ca în SHC, dar valorile deficienței sunt cu 19,1%, 15,6% și 18,0% mai mari, astfel încât în defectul dublu poate fi diferențiat de mono-defect dacă se cunosc valorile eficienței în cazul unui defect singular.

Prin armonicile  $I_U$  stările cu defect dublu pot fi detectate dacă se cunosc primele trei armonici și eficiența lor în detectarea cu un defectului singular.

### **5.2.2. Detectarea stărilor de defect dublu prin armonici ale curentului $I_v$**

Primele trei armonici cu cea mai mare valoare a eficienței în detectarea defectului dublu sunt aceleași pentru stările SHC&BB și BB&ECC, în consecință cele două stări nu pot fi diferențiate dacă armonicile mono-defect și eficiența lor nu sunt cunoscute.

În starea ECC&SHC primele trei armonici sunt diferite de cele din SHC&BB și BB&ECC, în consecință starea ECC&SHC poate fi diferențiată de celelalte defecte duble.

Primele două armonici în starea ECC&SHC sunt aceleași ca și în starea SHC, dar armonicile de 150 Hz au o eficiență de 2,89 ori mai mare în cazul dublei defecte, astfel încât starea ECC&SHC poate fi detectată și diferențiată dacă informațiile legate de mono-defect sunt cunoscute.

Dacă se cunosc primele trei armonici și eficiența lor în detectarea defectelor corespunzătoare mono-defectului, stările cu defect dublu pot fi detectate și diferențiate prin armonicile curentului  $I_U$ .

### **5.2.3. Detectarea stărilor de defect dublu prin armonici ale curentului $I_w$**

Primele trei armonici ale curentului  $I_w$  cu cea mai mare valoare a eficienței în detectarea defectelor sunt aceleași, 75 Hz, 225 Hz și 46 Hz, pentru stările SHC&BB, BB&ECC și BB.

Dacă defectul BB apare după defectul SHC, defectul dublu SHC&BB poate fi detectat și diferențiat de defectul unic și de defectul dublu ECC&SHC.

De asemenea, dacă defectul BB apare după defectul ECC, defectul BB&ECC poate fi detectat și diferențiat de defectul unic și de defectul dublu ECC&SHC.

Dar dacă defectele SHC sau ECC apar după ce defectul BB este deja prezent, SHC &BB și BB &ECC nu pot fi detectate ca defecte duble și nu pot fi diferențiate de defectul BB.

Starea ECC&SHC se caracterizează prin: aceeași primă armonică ca și starea SHC, 150 Hz; a doua armonică este prima în stare ECC, 6 Hz; a treia armonică ca stare SHC, 250 Hz; armonici diferite față de celelalte două stări cu dublu defect. Prin urmare, această stare de dublu defect poate fi diferențiată de defectele unice și duble numai dacă sunt cunoscute primele trei armonici ale defectelor unice.

### 5.3. Studiul detectării stării de defect triplu

În această secțiune sunt prezentate rezultatele legate de studiul privind detectarea stării de defect triplu.

În starea SHC&BB&ECC valorile rms ale curenților de fază sunt mai mici decât cele în stare sănătoasă, aproape la fel ca în SHC&BB și ușor mai mari decât în stările BB&ECC și BB. Dezechilibrul curentului în starea cu triplu defect este mult mai mare decât în cel sănătos, ușor mai mare decât în stările SHC&BB, mai mare decât stările ECC&SHC și SHC, tabelul 5.6.

Tabelul 5.6 Informații despre curenții trifazați din SHC&BB&ECC,

Stare	UI [A]	IV [A]	IW [A]	Im [A]	Dezechilibru actual [%]
SHC&BB&ECC	8.9110	9.1557	8.7859	8.9509	2.2884

Tabelul 5.7 Curenți și putere prin/în U1 și RSHC, SHC&BB&ECC, Stările SHC&BB, ECC&SHC și SHC, funcționarea motorului în sarcină

Stare	UII [A]	PU1 [W]	IRSHC [A]	PRSHC [W]
SHC&BB&ECC	9.1602	16.153	5.3932	261.78

În starea SHC&BB&ECC valoarea curentului  $I_{U1}$  este 9,1602 A, ușor mai mare decât cea din starea SHC&BB și mai mică decât valorile din stările ECC&SHC și SHC, tabelul 5.15.

Curentul  $I_{U1}$  este mai mare decât curentul  $I_U$  în starea SHC&BB&ECC și SHC&BB, mai mic decât curentul  $I_U$  în stările ECC&SHC și SHC, tabelele 5.6 și 5.7.

Puterea rezistorului RSHC este de 261,78 W, puțin mai mică decât cea din starea SHC&BB, ECC&SHC și SHC. Puterea în rezistorul R SHC este mai mare decât în bobina  $U_1$  în fiecare stare care prezintă defectul SHC, tabelul 5.15.

#### 5.3.1. Detectarea stării de defect triplu prin armonici ale curentului $I_U$

Primele trei armonici ale curentului  $I_U$  cu cele mai mari valori ale eficienței în detecția SHC&BB&ECC sunt identice și în aceeași ordine ca și cele din stările BB și SHC&BB, în consecință pentru starea SHC&BB&ECC poate fi identificată doar defectul BB și nu este sigur dacă aici sunt prezente și alte defecte, Tabelele 5.16 și 5.17.

Dacă defectul ECC apare după defectul dublu SHC&BB, primele trei armonici din defectul triplu, vor arăta la fel ca în starea SHC&BB, în consecință defectul triplu nu poate fi diferențiat de defectul dublu.

De asemenea, dacă defectul SHC apare după defectul dublu BB&ECC, numai a treia armonică din defectul triplu va fi diferită de cele din defectul dublu, în consecință defectul triplu poate fi diferențiat de defectul dublu.

Dar dacă defectul BB este suprapus peste defectul SHC&ECC, prima armonică din defectul dublu va fi a treia armonică pentru defectul triplu, iar prima și a doua sunt cele din starea BB, în consecință defectul triplu poate fi diferențiat de defectul dublu.

#### 5.3.2. Detectarea stării de defect triplu prin armonici ale curentului $I_V$

Primele trei armonici ale curentului  $I_V$  cu cele mai mari valori ale eficienței în detecția SHC&BB&ECC, 75 Hz, 100 Hz și 275 Hz, sunt identice și în aceeași ordine cu cele din stările SHC&BB și BB&ECC, dar valoarea eficienței pentru armonicele de 100 Hz este cu 42,7% mai mare dacă defectul ECC este suprapus peste defectul dublu SHC&BB și cu 86,39% mai mare dacă defectul SHC este suprapus peste defectul dublu BB&ECC, în consecință, dacă se monitorizează



valoarea eficienței în detectarea defectului corespunzător armoniciei de 100 Hz, defectul triplu poate fi diferențiat de stările cu defect dublu SHC&BB și BB&ECC.

De asemenea, armonicile de defect triplu sunt diferite de cele din ECC&SHC, 150 Hz, 10 Hz și 1500 Hz, în consecință defectul triplu poate fi identificat dacă un defect BB este suprapus peste defectul dublu ECC&SHC.

De asemenea, defectul triplu poate fi diferențiat de defectele unice.

### 5.3.3. Detectarea stării de defect triplu prin armonici ale curentului $I_w$

Pentru starea SHC&BB&ECC, primele trei armonici cu cele mai mari valori de eficiență în detectarea defectelor sunt identice și în aceeași ordine cu BB, SHC&BB și BB&ECC, în consecință defectul triplu nu poate fi diferențiat de aceste stări de defect.

Defectul triplu poate fi diferențiat de starea SHC, ECC și ECC&SHC dacă primele trei armonici sunt monitorizate în timpul ciclului de viață al motorului asincron.

## CAPITOLUL 6 DETECTAREA DEFECTELOR PRIN INDUCȚIA MAGNETICĂ DIN PROXIMITATEA MOTORULUI

Acest capitol prezintă rezultatele referitoare la influența și diagnosticul defectelor individuale și combinării lor asupra inducției magnetice, a componentelor sale, în partea laterală și proximitatea înfășurărilor de capăt, în vederea identificării armonicilor ce caracterizează fiecare defect pentru detecție și identificare la funcționarea în sarcină a motorului (2880 rpm).

### 6.1. Detectarea defectelor individuale

Pentru evaluarea componentei radiale  $B_x$  și a componentei axiale  $B_z$  a inducției magnetice sunt luate în considerare punctele din zona de aer din exteriorul motorului,  $M[116, 0, 0]$  și  $N[-116, 0, 0]$ , figura 6.1., care sunt plasate în planul de simetrie transversală  $z = 0$  al motorului și  $P[116, 0, 90]$  și  $Q[-116, 0, 90]$ , Fig. 6.1, în planul  $z = 90$  mm care traversează volumul înfășurării statorului în afara miezului magnetic.

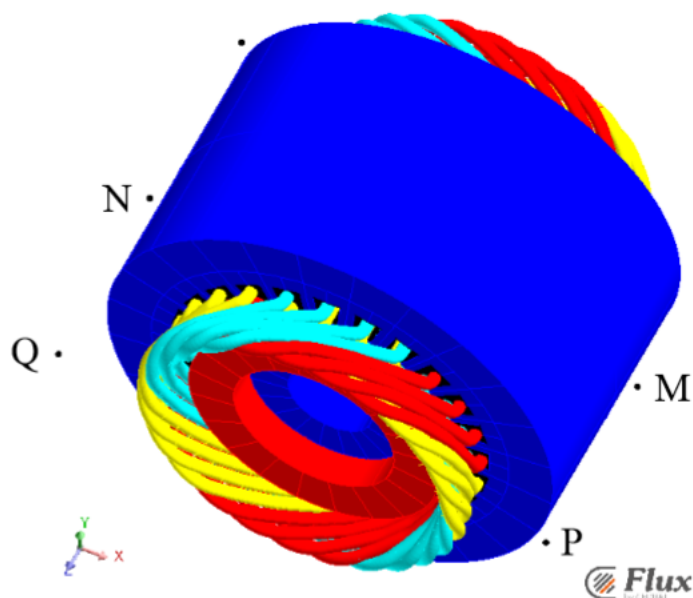


Fig. 6.1. Poziția punctelor pentru evaluarea câmpului magnetic

Criteriul impus pentru armonicile care trebuie luate în considerare este ca eficiența în detectarea defectelor, ecuația 6.1 să fie mai mare de 10 %.

**Prin armonicile câmpului  $B_x[M]-B_x[N]$**

Fig. 6.2 prezintă variația de timp a câmpului  $B_x[M]-B_x[N]$  pentru defectele SHC, BB, ECC și starea HE, analiza LF și în Fig. 6.3 din analiza HF.

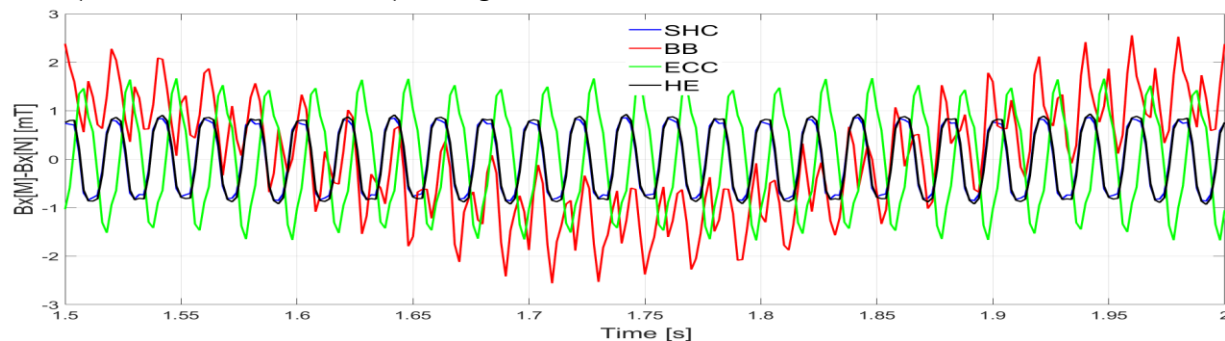


Fig. 6.2. Variația în timp a  $B_x[M]-B_x[N]$  pentru defectele SHC, BB, ECC și starea HE, analiză LF

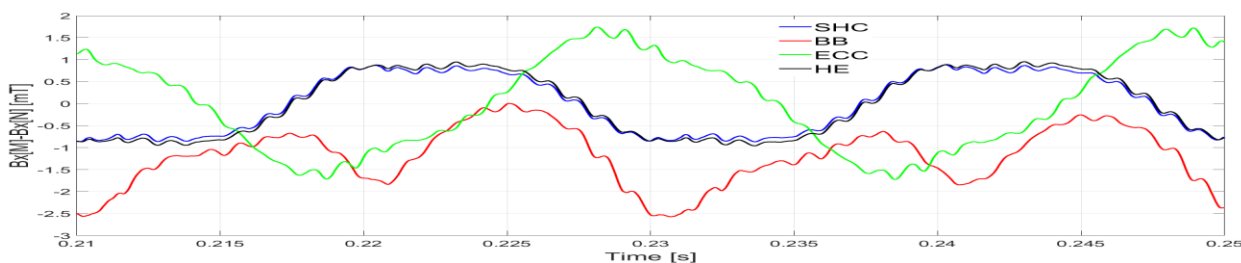


Fig. 6.3. Variația în timp a  $B_x[M]-B_x[N]$  pentru defectele SHC, BB, ECC și starea HE, analiză HF

Amplitudinile armonicilor  $B_x[M]-B_x[N]$  pentru defectele SHC, BB, ECC și analiza stării HE, LF sunt prezentate în Fig. 6.4, în Fig. 6.4. și 6.5. pentru armonici în intervalele [75 - 975] Hz și [1000 - 2000] Hz.

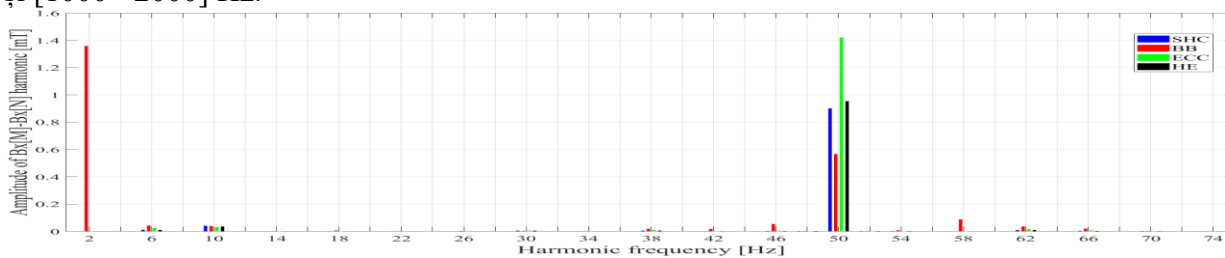


Fig. 6.4. Amplitudinile armonicilor  $B_x[M]-B_x[N]$  pentru defectele SHC, BB, ECC și starea HE, analiză LF

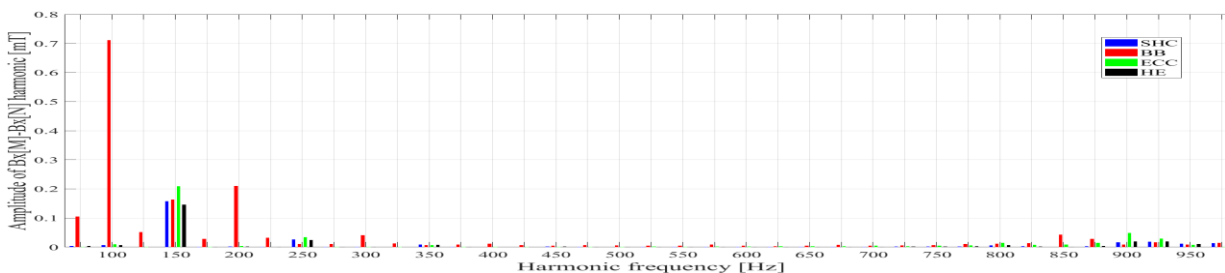


Fig. 6.5. Amplitudinile armonicilor  $B_x[M]-B_x[N]$  în intervalul [75 - 975] Hz pentru defectele SHC, BB, ECC și starea HE, analiză HF

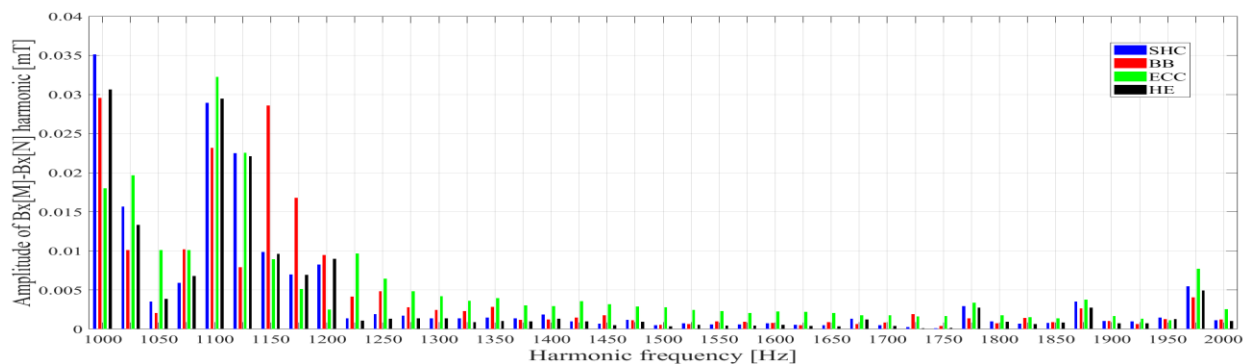


Fig. 6.6. Amplitudinile armonicilor  $Bx[M]-Bx[N]$  în intervalul [1000 - 2000] Hz pentru defectele SHC, BB, ECC și starea HE, analiză HF

### Prin armonicile câmpului $Bz[P] + Bz[Q]$

Fig. 6.7 prezintă variația de timp a  $Bz[M]-Bz[N]$  pentru defectele SHC, BB, ECC și starea HE, analiza LF și în Fig. 6.8 din analiza HF.

Amplitudinile armonicilor  $Bz[M]-Bz[N]$  pentru defectele SHC, BB, ECC și analiza stării HE, LF sunt prezentate în Fig. 6.9, în Fig. 6.10. și 6.11. pentru armonici în intervalele [75 - 975] Hz și [1000 - 2000] Hz.

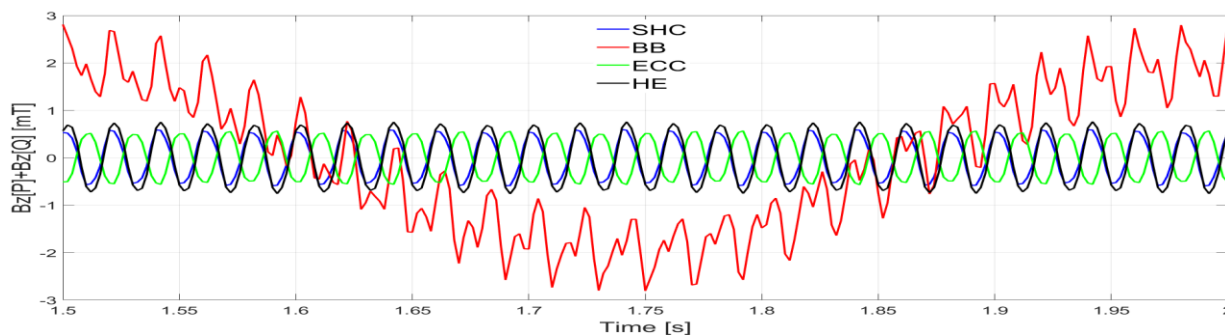


Fig. 6.7. Variația în timp a  $Bz[P]+Bz[Q]$  pentru defectele SHC, BB, ECC și starea HE, analiză LF

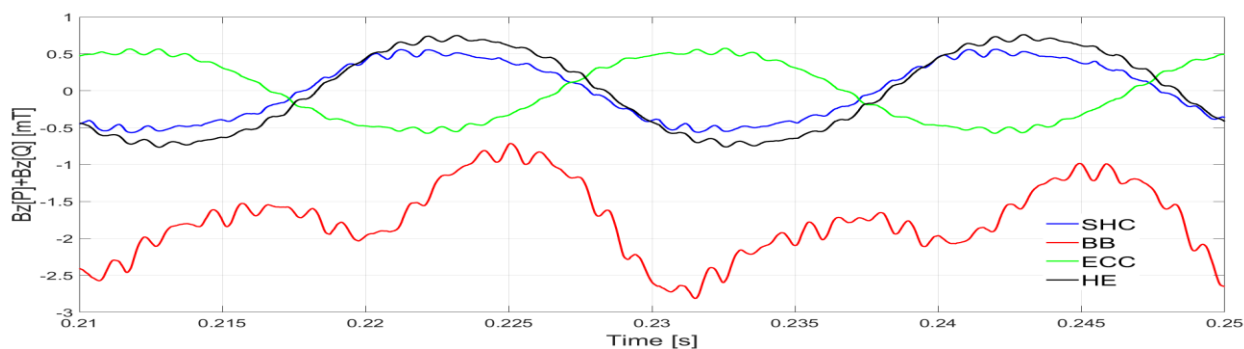


Fig. 6.8. Variația în timp a  $Bz[P]+Bz[Q]$  pentru defectele SHC, BB, ECC și starea HE, analiză HF

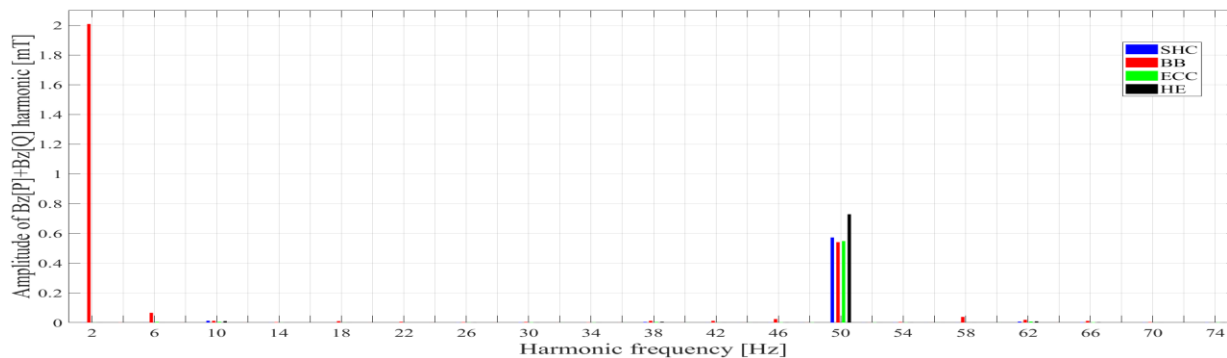


Fig. 6.9. Amplitudinile armonicilor  $Bz[P]+Bz[Q]$  pentru defectele SHC, BB, ECC și starea HE, analiză LF

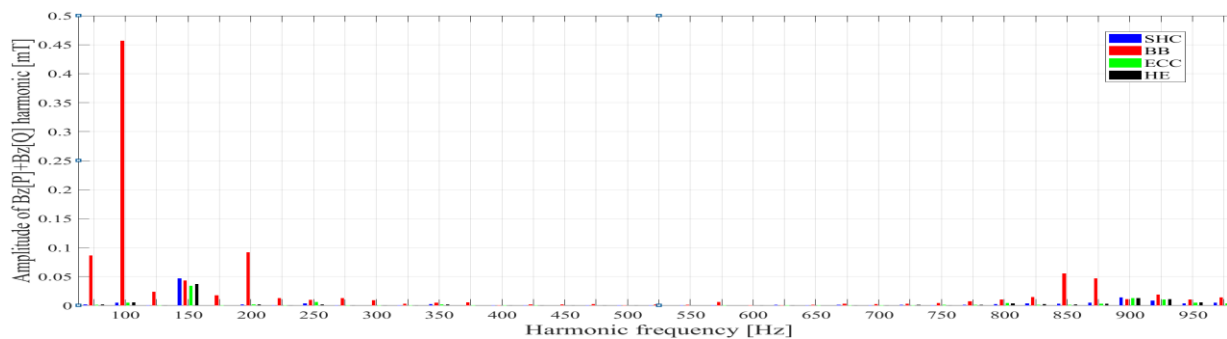


Fig. 6.10. Amplitudinile armonicilor  $Bz[P]+Bz[Q]$  în intervalul [75 - 975] Hz pentru defectele SHC, BB, ECC și starea HE, analiză HF

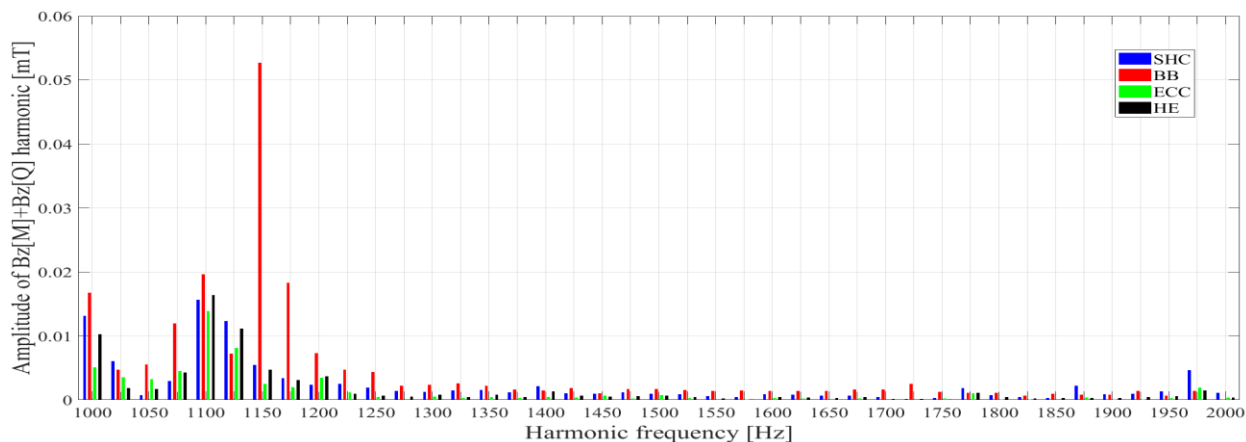


Fig. 6.11. Amplitudinile armonicilor  $Bz[P]+Bz[Q]$  în intervalul [1000 - 2000] Hz pentru defectele SHC, BB, ECC și starea HE, analiză HF

Tabelul 6.1 prezintă cele mai ridicate valori ale eficienței detectării defectelor pentru defectele unice SHC, BB și ECC.

Tabelul 6.1 Cele mai ridicate valori ale eficienței în detectarea defectelor unice

	<b>SHC</b>	<b>BB</b>	<b>ECC</b>
<b>Eficiență</b>	3.256	2364	18.59
<b>f [Hz]</b>	1025	2	6
<b>Componentă</b>	Bz(P)+Bz[Q]	Bz(P)+Bz[Q]	Bz(P)+Bz[Q]

În ceea ce privește defectul SHC, cele mai sensibile armonici ale inducției magnetice sunt: 1025 Hz de Bz[P] + Bz[Q] cu o creștere a amplitudinii de 3,256 ori, 800 Hz de By[P]-By[Q] cu o creștere de 3,085 și 1975 Hz de Bx[P]-Bx[Q] cu o creștere de 2,631. Acestea sunt armonici ale câmpului magnetic din apropierea înfășurărilor finale.

În ceea ce privește defectul BB, armonica de 2 Hz a lui Bz[P] + Bz[Q] are cea mai mare creștere a amplitudinii de 2364 de ori, urmată de armonica de 2 Hz a Bx[M]-Bx[N] cu creșteri de 1386 și armonica de 2 Hz a By[P]-By[Q] cu creștere de 366,5.

Defectul ECC poate fi detectată prin armonica de 6 Hz a Bz[P] + Bz[Q], care are o creștere a amplitudinii de 18,59 ori sau 825 Hz armonică a Bx[M] caracterizată printr-o creștere de 17,02 ori sau 1100 Hz a By[P]-By[Q] cu o creștere de 14,43 ori.

S-a constatat că prin armonicile Bz[P] + Bz[Q], pot fi detectate și diferențiate toate cele trei defecte, deoarece armonica cea mai influențată de un anumit defect este diferită, 1025 Hz pentru SHC, 2 Hz pentru BB și 6 Hz pentru ECC.

## 6.2. Detectarea defectelor duble

Cele mai mari valori ale eficienței în detectarea defectelor duble sunt prezentate în tabelul 6.2.

Tabelul 6.2 Cele mai ridicate valori ale eficienței în detectarea defectelor duble

	<b>SHC&amp;BB</b>	<b>BB&amp;ECC</b>	<b>ECC și SHC</b>
<b>Eficiență</b>	2363	1941	23.53
<b>f [Hz]</b>	2	2	6
<b>Componentă</b>	Bz[P] + Bz[Q]	Bz[P] + Bz[Q]	Bz[P] + Bz[Q]

În cazul defectului SHC&BB, cele mai sensibile armonici sunt: armonica de 2 Hz a lui Bz[P] + Bz[Q] care are o creștere a amplitudinii de 2363 ori, armonicile de 2 Hz ale lui Bx[M]-Bx[N], cu o eficiență de 1386 ori, și armonicile de 2 Hz ale By[P]-By[Q], care are o eficiență de 367,9.

În ceea ce privește defectul BB&ECC, armonica de 2 Hz a lui Bz[P] + Bz[Q] are cea mai mare valoare a eficienței din 1941, următoarele sunt armonicile de 2 Hz ale Bx[M]-Bx[N], cu o eficiență de 1431 și armonicile de 2 Hz ale Bx[P]-Bx[Q], cu o eficiență de 445,8.

Pentru defectele SHC&ECC s-a constatat că armonica de 6 Hz a lui Bz[P] + Bz[Q] are cea mai mare valoare a eficienței, 23,53, următoarele două sunt armonica de 825 Hz a lui Bx[M] cu o eficiență de 16,37 și armonica de 850 Hz a lui Bx[M]-Bx[N] cu o eficiență de 16,26.

În ceea ce privește defectul triplu SHC&BB&ECC, acest defect are cea mai mare influență asupra armonicii de 2 Hz a Bz[P] + Bz[Q], cu o creștere de 1938 ori, a armonicii de 2 Hz a Bx[M]-Bx[N], care are o creștere de 1429 ori, și a armonicii de 2 Hz a Bx[P]-Bx[Q], cu o creștere de 449,8 ori.

În cazul defectului SHC&BB, armonica de 100 Hz a By[M] dacă prima, cu o eficiență de 48,47, pentru BB&ECC prima armonică este cea de 200 Hz, cu o eficiență de 73,26, iar în cazul

ECC&SHC este armonică de 1100 Hz, cu o eficiență de 2,749. Prin urmare, defectele duble pot fi detectate și diferențiate prin armonicile  $B_y[M]$ .

Prin armonicile  $B_y[P]$ - $B_y[Q]$ , defectele duble pot fi detectate și diferențiate, deoarece pentru defectul SHC&BB armonicile cu cea mai mare eficiență de 367,9 sunt cele de 2 Hz, pentru BB&ECC sunt cele de 46 Hz, dar au o valoare de eficiență similară cu cea de 2 Hz. cu o eficiență de 232,5 și 1100 Hz, cu o eficiență de 14,54 pentru ECC&SHC.

### 6.3. Detectarea defectului triplu, SHC&BB&ECC

Tabelul 6.3. prezintă eficiența în detectarea defectelor SHC&BB&ECC prin armonicile LF&HF ale  $B_z[P] + B_z[Q]$ . Se poate observa că armonică de 2 Hz are cea mai mare eficiență.

Tabelul 6.3 Eficiența detectării defectelor SHC&BB&ECC prin armonicile LF&HF ale  $B_z[P] + B_z[Q]$

f [Hz]	2	6	58	100	300	22	175	200	18	75
SHC&BB&ECC [ $\mu T$ ]	1645	54.43	35.66	362	25.42	5.205	11.71	76.34	8.123	71.27
HE [ $\mu T$ ]	0.849	0.253	0.486	5.327	0.411	0.0934	0.223	1.818	0.211	1.934
SHC&BB&ECC/HE	1938	215	73.43	67.96	61.9	55.74	52.63	42	38.54	36.84

## CAPITOLUL 7 INVESTIGAREA EXPERIMENTALĂ A DEFECTULUI DE SCURTCIRCUIT

În acest capitol sunt prezentate rezultatele experimentale și cu elemente finite obținute în urma analizei influenței defectului de scurtcircuit asupra câmpului magnetic din vecinătatea motoarelor cu inducție investigate prin variația în timp a tensiunii de ieșire a senzorilor bobinei, în cazul stărilor motorii sănătoase și defecte, pentru funcționarea motorului fără sarcină/în sarcină.

### 7.1. Rezultatele experimentale obținute pentru motorul cu inducție în cazul defectului de scurtcircuit

În această subsecțiune sunt prezentate rezultatele experimentale pentru motorul cu inducție cu doi poli pentru funcționarea fără sarcină în trei poziții pentru senzorii bobinei:



Fig. 7.1. Sistem experimental pentru investigarea câmpului magnetic extern și generarea de scurtcircuite artificiale

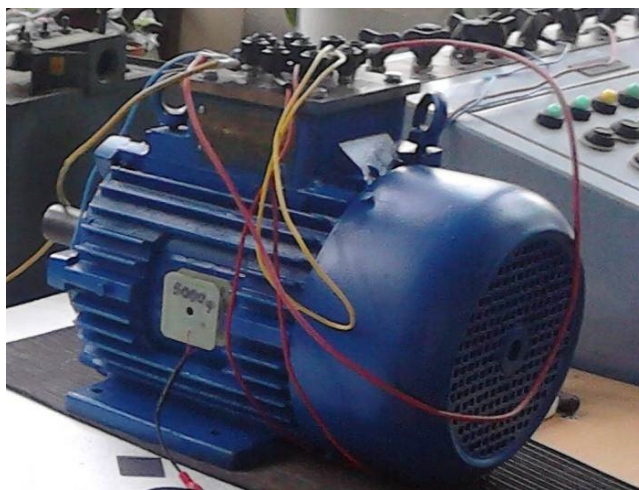


Fig. 7.2. Bobină Sensor\_Ox2 poziție în apropierea miezului statorului

Rezultatele experimentale atunci când bobina Sensor\_Ox2 este în poziția din figura 7.2 și bobina Sensor\_Ox1 este la 180 de grade față de celălalt senzor al bobinei

Rezultatele sunt obținute pentru trei cazuri: HE0 sănătos, defect slab când curentul prin rezistența variabilă este de 5 A, FA05 și defect puternic când curentul este de 10 A, FA10.



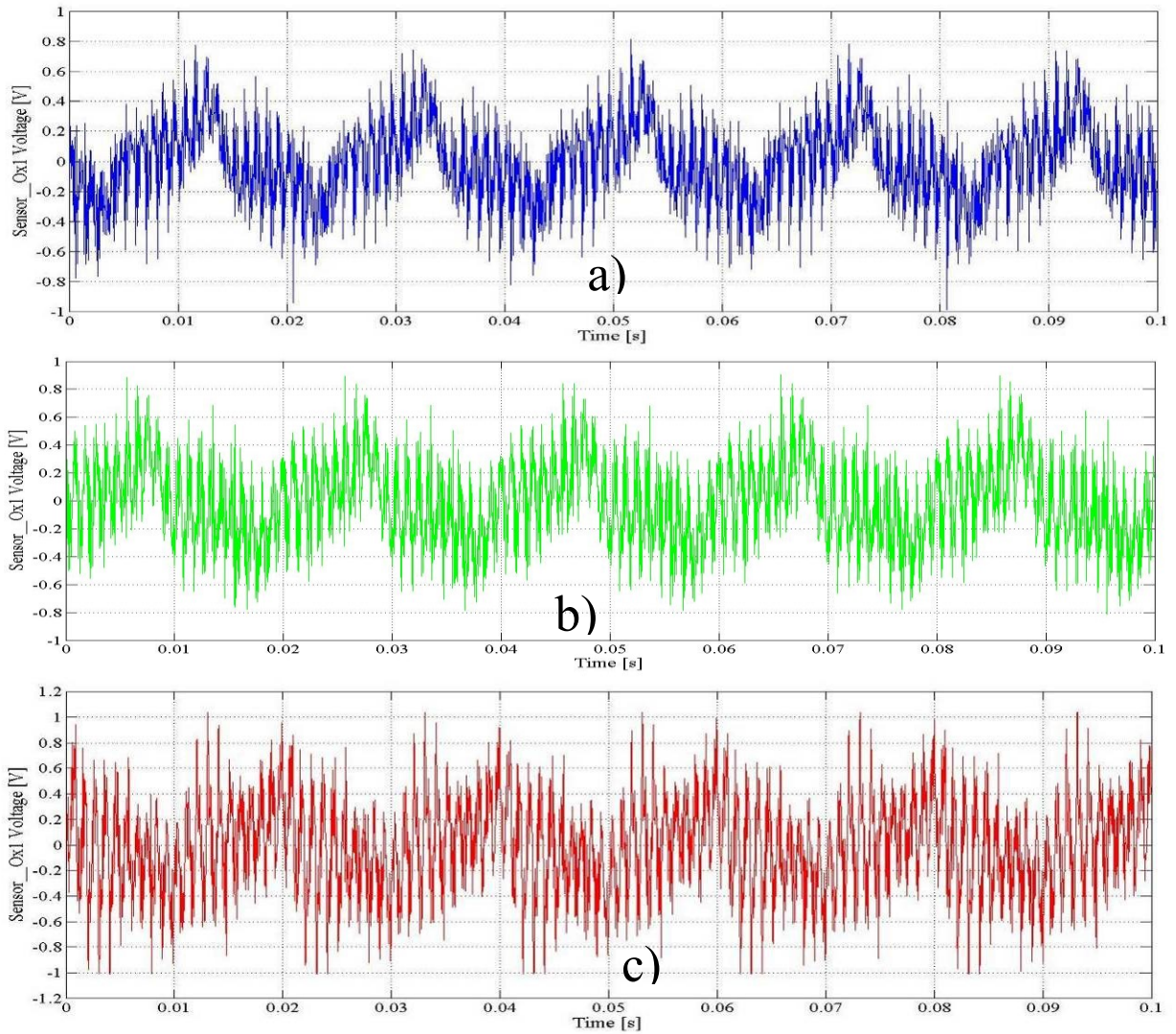


Fig. 7.3. Variația de timp a tensiunii Sensor\_Ox1 pentru a) sănătos, b) defect slab și c) cazuri de defect puternic

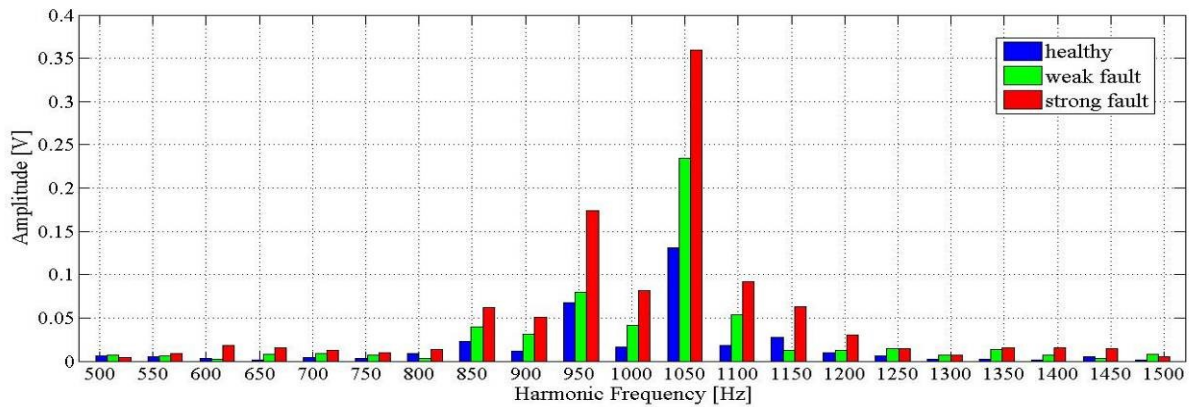


Fig. 7.4. Amplitudinea armonicilor de tensiune Sensor\_Ox1



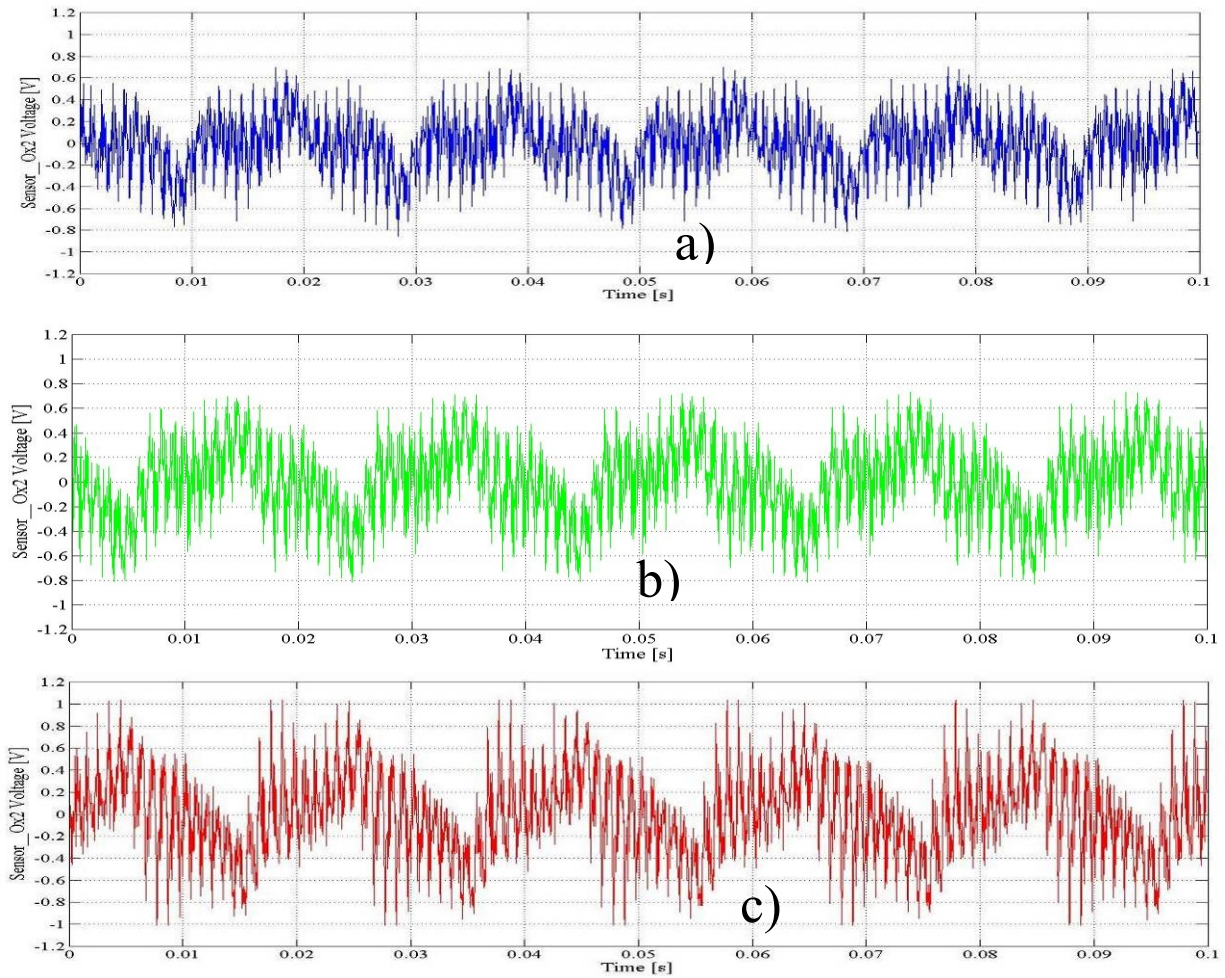


Fig. 7.5. Variația în timp a tensiunii Sensor\_Ox2 pentru a) sănătos, b) defect slab și c) cazuri de defect puternic

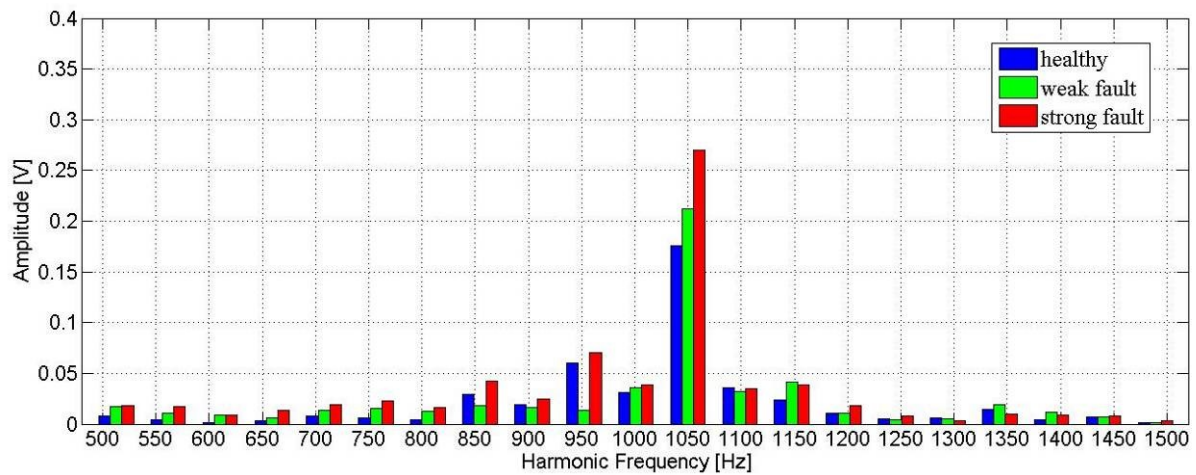


Fig. 7.6. Amplitudinea armonicilor de tensiune Sensor\_Ox2

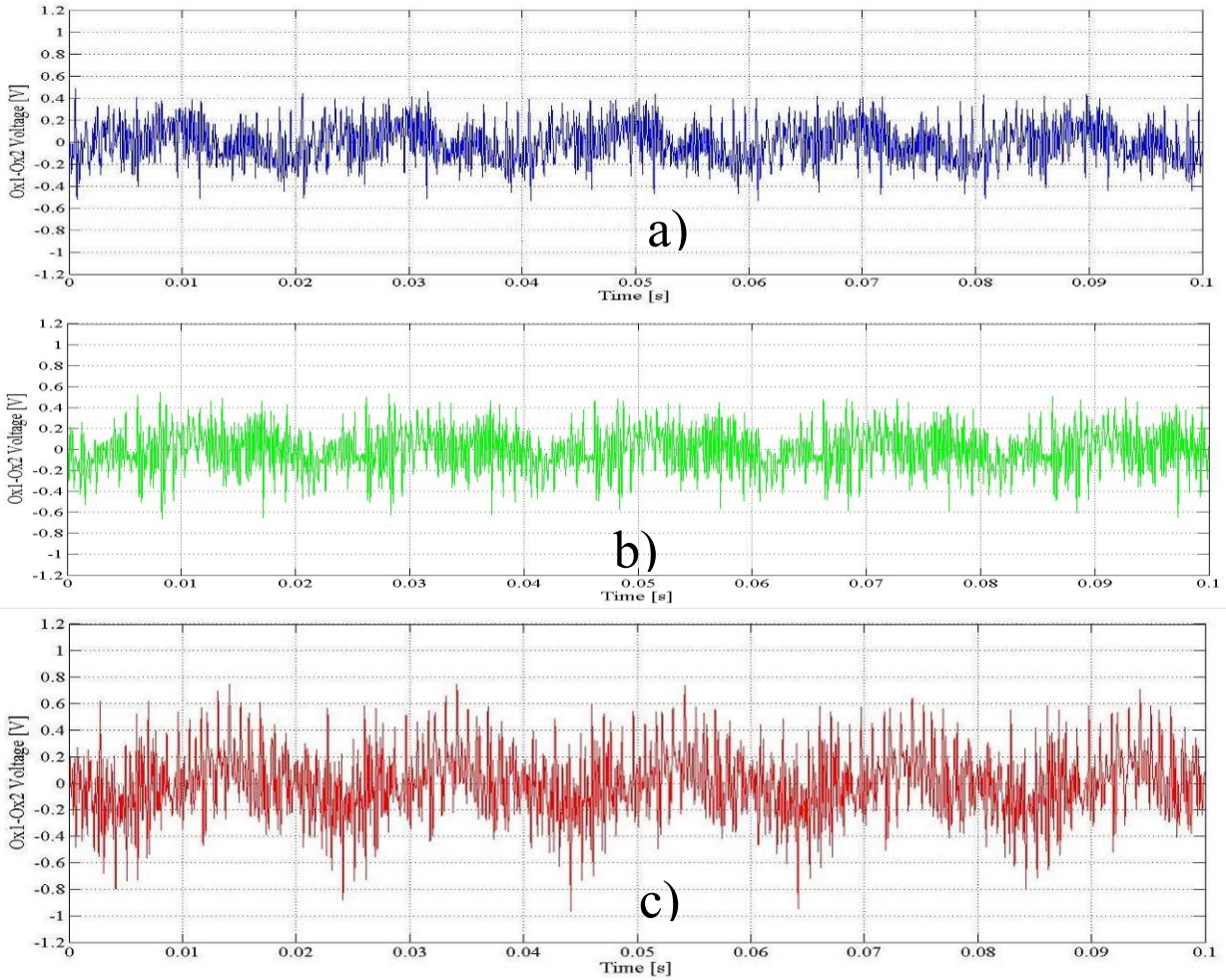


Fig. 7.7. Variația de timp a tensiunii Ox1-Ox2 pentru a) sănătos, b) defect slab și c) cazuri de defect puternic

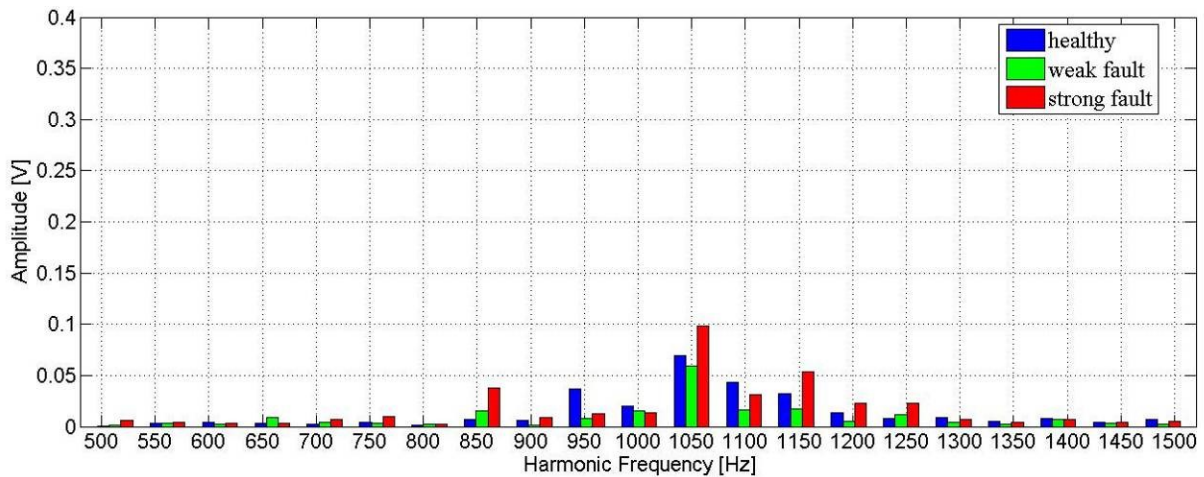


Fig. 7.8. Amplitudinea armonicilor tensiunii Ox1-Ox2

Valorile rms ale tensiunilor Ox1, Ox2 și Ox1-Ox2 pentru motorul de inducție sănătos, HE0 și defect, FA05 și FA10 sunt prezentate în tabelul 7.1. Valorile sunt mai mari atunci când motorul cu inducție este defect.

Tabelul 7.1. Valorile rms pentru tensiunile de ieșire ale senzorilor bobinei [V]

	SensorOx1	SensorOx2	Ox1-Ox2
HE0	0.279	0.287	0.179
FA01	0.315	0.321	0.197
FA02	0.390	0.394	0.245

## **CONCLUZII GENERALE, CONTRIBUȚII LA TEZĂ ȘI PROPUNERI PENTRU CERCETĂRI VIITOARE**

### **C1. CONCLUZII GENERALE**

Defectele au influență asupra valorii medii a cuplului electromagnetic al motorului asincron și creează o forță electromagnetică unilaterală asupra rotorului, datorită unei nesimetrii a câmpului magnetic din interiorul motorului asincron, forța care va acționa asupra rulmenților scurtând durata de viață a acestora. Forța este, de asemenea, prezentă în funcționarea în sarcină și fără sarcină a motorului.

Prin intermediul armonicilor curenților de fază poate fi decelat dacă un defect este SHC, BB sau ECC.

Stările de defect dublu pot fi detectate prin armonicile curenților de fază dacă se cunosc primele trei armonici și eficiența lor în detectarea cu defectului singular.

Defectul triplu poate fi diferențiat de starea SHC, ECC și ECC&SHC dacă primele trei armonici sunt monitorizate în timpul ciclului de viață al motorului asincron.

Primele trei armonici ale curentului  $I_U$  cu cele mai mari valori ale eficienței în detecția SHC&BB&ECC sunt identice și în aceeași ordine ca și cele din stările BB și SHC&BB, în consecință pentru starea SHC&BB&ECC poate fi identificat doar defectul BB și nu este sigur dacă mai sunt prezente și alte defecte. Dacă defectul ECC apare după defectul dublu SHC&BB, primele trei armonici din defectul triplu vor fi la fel ca în starea SHC&BB, în consecință defectul triplu nu poate fi diferențiat de defectul dublu. De asemenea, dacă defectul SHC apare după defectul dublu BB&ECC, numai a treia armonică din defectul triplu va fi diferită de cele din defectul dublu, în consecință defectul triplu poate fi diferențiat de defectul dublu. Dar dacă defectul BB este suprapus peste defectul SHC&ECC, prima armonică din defectul dublu va fi a treia armonică pentru defectul triplu, iar prima și a doua sunt cele din starea BB, în consecință defectul triplu poate fi diferențiat de defectul dublu.

Primele trei armonici ale curentului  $I_v$  cu cele mai mari valori ale eficienței în detecția SHC&BB&ECC, 75 Hz, 100 Hz și 275 Hz, sunt identice și în aceeași ordine cu cele din stările SHC&BB și BB&ECC, dar valoarea eficienței pentru armonicile de 100 Hz este cu 42,7% mai mare dacă defectul ECC este suprapus peste defectul dublu SHC&BB și cu 86,39% mai mare dacă defectul SHC este suprapus peste defectul dublu BB&ECC, în consecință, dacă se monitorizează valoarea eficienței în detectarea defectului corespunzătoare armonicilor de 100 Hz, defectul triplu poate fi diferențiat de stările cu dublu defect SHC&BB și BB&ECC. De asemenea, armonicile defectului triplu sunt diferite de cele din ECC&SHC, 150 Hz, 10 Hz și 1500 Hz, în consecință

defectul triplu poate fi identificat dacă un defect BB este suprapus peste defectul dublu ECC&SHC. De asemenea, defectul triplu poate fi diferențiat de defectele individuale.

Pentru starea SHC&BB&ECC, primele trei armonici cu cele mai mari valori de eficiență în detectarea defectelor sunt identice și în aceeași ordine cu BB, SHC&BB și BB&ECC, în consecință defectul triplu nu poate fi diferențiat de aceste stări de defect. Defectul triplu poate fi diferențiat de starea SHC, ECC și ECC&SHC dacă primele trei armonici sunt monitorizate în timpul ciclului de viață al motorului asincron.

Prin câmpul magnetic din apropierea motoarelor, în special în apropierea capetelor înfășurărilor, se detectează și se diferențiază defectele individuale și defectele duble, deoarece defectul triplu este puțin mai complicat, presupune cunoașterea evoluției defectului pentru a-l diferenția de celelalte.

Din rezultatele experimentale s-a observat că defectul de scurtcircuit poate fi detectat prin valorile rms sau altitudinile armonicilor tensiunilor induse în bobinele de câmp ori prin scăderea acestor tensiuni.

## C2. CONTRIBUȚIILE TEZEI

Contribuția inițială constă în primul rând în dezvoltarea modelelor cu elemente finite 3D, folosind software-ul comercial Altair Flux 3D, pentru studiul a trei tipuri de defecte diferite: scurtcircuit, bară întreruptă, excentricitate statică și combinații ale acestora.

Studiile în domeniul timpului au fost efectuate pentru starea de funcționare normală sănătoasă, defecte unice, defecte duble (scurtcircuit și bară întreruptă și excentricitate statică, excentricitate statică și scurtcircuit) și triplu defect (scurtcircuit și bară întreruptă și excentricitate statică). Pentru fiecare caz au fost dezvoltate două modele cu elemente finite 3D pentru a analiza armonicile joase în intervalul [2 Hz; 74 Hz] și armonicile înalte în domeniul [75 Hz; 200 Hz]. Pentru a fi simulat fiecare model 3D durează 3 săptămâni și are ca rezultat un set de date de aproximativ 300 GB.

Definirea eficienței în detectarea defectelor ca fiind de raportul dintre valoarea amplitudinii armonici în stare cu defect)/(valoarea amplitudinii armonici în stare sănătoasă) = FA/HE.

Pentru calculul eficienței în detectarea defectelor, s-au efectuat analize FFT pentru curenții de fază și componentele inducției magnetice în planul de simetrie și în vecinătatea capetelor înfășurărilor.

## C3. PROPUNERI PENTRU PERSPECTIVE VIITOARE

Ca perspectiva de viitor aș dori să obțin câteva rezultate experimentale privind defectul mono, dublu și triplu, curenții, tensiunile induse în bobinele de câmp, cuplul pentru măsurarea forței electromagnetice unilaterale asupra rotorului și compararea datelor obținute cu simulările.

## REFERINȚE

- [1] Nandi, S.; Toliyat, H.A.; Li, X. Condition Monitoring and Fault Diagnosis of Electrical Motors—A Review. *IEEE Trans. Energy Convers.* 2005, 20, 719–729.
- [2] Thorsen, O.V.; Dalva, M. Failure Identification and Analysis for High-Voltage Induction Motors in the Petrochemical Industry. *IEEE Trans. Ind. Appl.* 1999, 35, 810–818.
- [3] Bell, R.N.; Heising, C.R.; O'Donnell, P.; Wells, S.J.; Singh, C. Report of Large Motor Reliability Survey of Industrial and Commercial Installations, Part II. *IEEE Trans. Ind. Appl.* 1985, IA-21, 865–872.
- [4] Sa'ad Ahmed Saleh Al Kazzaz, G.K Singh, Experimental investigations on induction machine condition monitoring and fault diagnosis using digital signal processing techniques, *Electric Power*



- Systems Research, Volume 65, Issue 3, 2003, Pages 197-221, ISSN 0378-7796, [https://doi.org/10.1016/S0378-7796\(02\)00227-4](https://doi.org/10.1016/S0378-7796(02)00227-4).
- [5] M. R. W. Group, “Report of large motor reliability survey of industrial and commercial installations, part ii,” *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. IA-21, no. 4, pp. 865–872, July 1985.
- [6] Asad, B.; Vaimann, T.; Rassölkin, A.; Kallaste, A.; Belahcen, A. A Survey of Broken Rotor Bar Fault Diagnostic Methods of Induction Motor. *Electr. Control. Commun. Eng.* 2018, 14, 117–124.
- [7] Bellini, A.; Filippetti, F.; Tassoni, C.; Capolino, G.-A. Advances in Diagnostic Techniques for Induction Machines. *IEEE Trans. Ind. Electron.* 2008, 55, 4109–4126.
- [8] Alsaedi, M.A. Fault Diagnosis of Three-Phase Induction Motor: A Review. *Optics* 2015, 4, 1–8.
- [9] Sardar, M.U.; Vaimann, T.; Kütt, L.; Kallaste, A.; Asad, B.; Akbar, S.; Kudelina, K. Inverter-Fed Motor Drive System: A Systematic Analysis of Condition Monitoring and Practical Diagnostic Techniques. *Energies* 2023, 16, 5628.
- [10] Cho, D.H.; Jung, H.K.; Chung, T.K.; Lee, C.G. Design of a Short-Time Rating Interior Permanent Magnet Synchronous Motor Using a Niching Genetic Algorithm. *IEEE Trans. Magn.* 2000, 36, 1936–1940.
- [11] Yun, J.; Park, S.; Yang, C.; Park, Y.; Lee, S.B.; Šaši'c, M.; Stone, G.C. Comprehensive Monitoring of Field Winding Short Circuits for Salient Pole Synchronous Motors. *IEEE Trans. Energy Convers.* 2019, 34, 1686–1694.
- [12] Cherif, H.; Menacer, A.; Romary, R.; Pusca, R. Dispersion Field Analysis Using Discrete Wavelet Transform for Inter-Turn Stator Fault Detection in Induction Motors. In *Proceedings of the 2017 IEEE 11th International Symposium on Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics and Drives, SDEMPED 2017*, Tinos, Greece, 29 August–1 September 2017.
- [13] Kim, T.H.; Lee, J. Comparison of the Iron Loss of a Flux-Reversal Machine under Four Different PWM Modes. *IEEE Trans. Magn.* 2007, 43, 1725–1728.
- [14] de Souza, R.P.P.; Agulhari, C.M.; Goedel, A.; Castoldi, M.F. Inter-Turn Short-Circuit Fault Diagnosis Using Robust Adaptive Parameter Estimation. *Int. J. Electr. Power Energy Syst.* 2022, 139, 107999.
- [15] Das, S.; Purkait, P.; Dey, D.; Chakravorti, S. Monitoring of Inter-Turn Insulation Failure in Induction Motor Using Advanced Signal and Data Processing Tools. *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.* 2011, 18, 1599–1608.
- [16] Liang, H.; Chen, Y.; Liang, S.; Wang, C. Fault Detection of Stator Inter-Turn Short-Circuit in Pmsm on Stator Current and Vibration Signal. *Appl. Sci.* 2018, 8, 1677. [CrossRef]
- [17] Praveen Kumar, N.; Isha, T.B. FEM Based Electromagnetic Signature Analysis of Winding Inter-Turn Short-Circuit Fault in Inverter Fed Induction Motor. *CES Trans. Electr. Mach. Syst.* 2019, 3, 309–315.
- [18] Hong, J.; Park, S.; Hyun, D.; Kang, T.J.; Lee, S.B.; Kral, C.; Haumer, A. Detection and Classification of Rotor Demagnetization and Eccentricity Faults for PM Synchronous Motors. *IEEE Trans. Ind. Appl.* 2012, 48, 923–932.
- [19] Terron-Santiago, C.; Martinez-Roman, J.; Puche-Panadero, R.; Sapena-Bano, A. A Review of Techniques Used for Induction Machine Fault Modelling. *Sensors* 2021, 21, 4855.
- [20] Edomwandekhoe, K.; Liang, X. Current Spectral Analysis of Broken Rotor Bar Faults for Induction Motors. In *Proceedings of the Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering*, Quebec City, QC, Canada, 13–16 May 2018.
- [21] Spyropoulos, D.V.; Gyftakis, K.N.; Kappatou, J.; Mitronikas, E.D. The Influence of the Broken Bar Fault on the Magnetic Field and Electromagnetic Torque in 3-Phase Induction Motors. In

- Proceedings of the 2012 20th International Conference on Electrical Machines, ICEM, Marseille, France, 2–5 September 2012.
- [22] Goktas, T.; Arkan, M.; Salih Mamis, M.; Akin, B. Broken Rotor Bar Fault Monitoring Based on Fluxgate Sensor Measurement of Leakage Flux. In Proceedings of the 2017 IEEE International Electric Machines and Drives Conference, IEMDC, Miami, FL, USA, 21–24 May 2017.
- [23] Asad, B.; Eensalu, L.; Vaimann, T.; Kallaste, A.; Rassolkin, A.; Belahcen, A. The FEM Based Modeling and Corresponding Test Rig Preparation for Broken Rotor Bars Analysis. In Proceedings of the 2019 IEEE 60th Annual International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University, RTUCON, Riga, Latvia, 7–9 October 2019.
- [24] Constantin, A.I. Detection Based on Stator Current Signature of the Single and Combined Short-Circuit, Broken Bar and Eccentricity Faults in Induction Motors. In Proceedings of the 2019 11th International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering, ATEE, Bucharest, Romania, 28–30 March 2019.
- [25] Sobczyk, T.J.; Tulicki, J.; Weinreb, K.; Mielnik, R.; Sulowicz, M. Characteristic Features of Rotor Bar Current Frequency Spectrum in Cage Induction Machine with Inner Faults. In Proceedings of the 2019 IEEE 12th International Symposium on Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics and Drives, SDEMPED, Toulouse, France, 27–30 August 2019.
- [26] Jannati, M.; Idris, N.R.N.; Salam, Z. A New Method for Modeling and Vector Control of Unbalanced Induction Motors. In Proceedings of the 2012 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, ECCE, Raleigh, NC, USA, 15–20 September 2012.
- [27] Malekpour, M.; Phung, B.T.; Ambikairajah, E. Online Technique for Insulation Assessment of Induction Motor Stator Windings under Different Load Conditions. *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.* 2017, 24, 349–358.
- [28] Zoeller, C.; Vogelsberger, M.A.; Wolbank, T.M.; Ertl, H. Impact of SiC Semiconductors Switching Transition Speed on Insulation Health State Monitoring of Traction Machines. *IET Power Electron.* 2016, 9, 2769–2775.
- [29] Cavallini, A.; Montanari, G.C.; Fabiani, D.; Tozzi, M. The Influence of PWM Voltage Waveforms on Induction Motor Insulation Systems: Perspectives for the End User. In Proceedings of the SDEMPED 2011—8th IEEE Symposium on Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics and Drives, Bologna, Italy, 5–8 September 2011.
- [30] Faiz, J.; Ojaghi, M. Unified Winding Function Approach for Dynamic Simulation of Different Kinds of Eccentricity Faults in Cage Induction Machines. *IET Electr. Power Appl.* 2009, 3, 461–470.
- [31] TOUHAMI, O.; AIBECHE, A.; ABDELLI, R.; BOUZIDA, A. Dynamic Eccentricity Fault Diagnosis in Induction Motors Using Finite Element Method and Experimental Tests. *Int. J. Ind. Electron. Drives* 2017, 3, 199–209.
- [32] Sobra, J.; Vaimann, T.; Belahcen, A. Mechanical Vibration Analysis of Induction Machine under Dynamic Rotor Eccentricity. In Proceedings of the Proceedings—2016 17th International Scientific Conference on Electric Power Engineering, EPE 2016, Prague, Czech Republic, 16–18 May 2016.
- [33] Alfredo Munoz, R.; Gonzalo Nahmias, C. Mechanical Vibration of Three-Phase Induction Motors Fed by Nonsinusoidal Currents. In Proceedings of the 3rd International Power Electronics Congress—CIEP, Puebla, Mexico, 21–25 August 1994.
- [34] Luo, G.; Habetler, T.G.; Hurwitz, J. Stray Flux-Based Incipient Stage Bearing Fault Detection for Induction Machines via Noise Cancellation Techniques. In Proceedings of the ECCE 2020—IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, Detroit, MI, USA, 11–15 October 2020.
- [35] Fireteanu, V.; Lombard, P.; Constantin, A.I. Detection of a Short-Circuit Fault in the Stator Winding of Induction Motors through Neighboring Magnetic Field Harmonics. In Proceedings of the 2014

- International Conference on Electrical Machines, ICEM 2014, Berlin, Germany, 2–5 September 2014.
- [36] Frosini, L.; Harlisca, C.; Szabo, L. Induction Machine Bearing Fault Detection by Means of Statistical Processing of the Stray Flux Measurement. *IEEE Trans. Ind. Electron.* 2015, 62, 1846–1854.
- [37] Yea, M.; Han, K.J. Modified Slot Opening for Reducing Shaft-to-Frame Voltage of AC Motors. *Energies* 2020, 13, 760.
- [38] Lopes, P.J.A.; Soares, F.J.; Almeida, R.P.M.; Baptista, P.C.; Silva, C.M.; Farias, T.L. Quantification of Technical Impacts and Environmental Benefits of Electric Vehicles Integration on Electricity Grids. In Proceedings of the 2009 8th International Symposium on Advanced Electromechanical Motion Systems and Electric Drives Joint Symposium, ELECTROMOTION, Lille, France, 1–3 July 2009.
- [39] Balaram, V. Rare Earth Elements: A Review of Applications, Occurrence, Exploration, Analysis, Recycling, and Environmental Impact. *Geosci. Front.* 2019, 10, 1285–1303.
- [40] Zaripova, A.D.; Zaripov, D.K.; Usachev, A.E. Visualization of High-Voltage Insulators Defects on Infrared Images Using Computer Vision Methods. *Sci. Vis.* 2019, 11, 88–98. [CrossRef]
- [41] Plazenet, T.; Boileau, T.; Caironi, C.; Nahid-Mobarakeh, B. An Overview of Shaft Voltages and Bearing Currents in Rotating Machines. In Proceedings of the IEEE Industry Application Society, 52nd Annual Meeting: IAS 2016, Portland, OR, USA, 2–6 October 2016.
- [42] Alger, P.L.; Samson, H.W. Shaft Currents in Electric Machines. *Trans. Am. Inst. Electr. Eng.* 1924, 43, 235–245.
- [43] Kerszenbaum, I. Shaft Currents in Electric Machines Fed by Solid-State Drives. In Proceedings of the IEEE Conference Record of Industrial and Commercial Power Systems Technical Conference, Pittsburgh, PA, USA, 4–7 May 1992.
- [44] Mocanu, R.; Onea, A. Determination of Stator Temperature for Thermal Protection in a Permanent Magnet Synchronous Machine. In Proceedings of the 2017 25th Mediterranean Conference on Control and Automation, MED, Valletta, Malta, 3–6 July 2017.
- [45] Nair, D.G.; Rasilo, P.; Arkkio, A. Sensitivity Analysis of Inverse Thermal Modeling to Determine Power Losses in Electrical Machines. *IEEE Trans. Magn.* 2018, 54, 8109405.
- [46] Wallscheid, O.; Böcker, J. Global Identification of a Low-Order Lumped-Parameter Thermal Network for Permanent Magnet Synchronous Motors. *IEEE Trans. Energy Convers.* 2016, 31, 354–365.
- [47] Choudhary, A.; Goyal, D.; Shimi, S.L.; Akula, A. Condition Monitoring and Fault Diagnosis of Induction Motors: A Review. *Arch. Comput. Methods Eng.* 2019, 26, 1221–1238.
- [48] Tita, M.C.; Bitoleanu, A. Technologies and Pollution Factors in Electrical Machines Factory. In Proceedings of the 2012 International Conference on Applied and Theoretical Electricity, ICATE, Craiova, Romania, 25–27 October 2012.
- [49] Lopez-Perez, D.; Antonino-Daviu, J. Application of Infrared Thermography to Failure Detection in Industrial Induction Motors: Case Stories. *IEEE Trans. Ind. Appl.* 2017, 53, 1901–1908.
- [50] Sheikh, M.A.; Nor, N.M.; Ibrahim, T.; Bin Hamdan, M.F. A New Method for Detection of Unbalanced Voltage Supply through Rotor Harmonics and Symbolic State Dynamics. In Proceedings of the International Conference on Intelligent and Advanced Systems, ICIAS 2016, Kuala Lumpur, Malaysia, 15–17 August 2016.
- [51] Jlassi, I.; Estima, J.O.; El Khil, S.K.; Bellaaj, N.M.; Cardoso, A.J.M. A Robust Observer-Based Method for IGBTs and Current Sensors Fault Diagnosis in Voltage-Source Inverters of PMSM Drives. *IEEE Trans. Ind. Appl.* 2017, 53, 2894–2905.

- [52] Bourogaoui, M.; Sethom, H.B.A.; Belkhdja, I.S. Speed/Position Sensor Fault Tolerant Control in Adjustable Speed Drives—A Review. *ISA Trans.* 2016, 64, 269–284.
  - [53] Quang, N.K.; Hieu, N.T.; Ha, Q.P. FPGA-Based Sensorless PMSM Speed Control Using Reduced-Order Extended Kalman Filters. *IEEE Trans. Ind. Electron.* 2014, 61, 6574–6582.
  - [54] Chen, C.X.; Xie, Y.X.; Lan, Y.H. Backstepping Control of Speed Sensorless Permanent Magnet Synchronous Motor Based on Slide Model Observer. *Int. J. Autom. Comput.* 2015, 12, 149–155.
  - [55] Choi, C.; Lee, K.; Lee, W. Observer-Based Phase-Shift Fault Detection Using Adaptive Threshold for Rotor Position Sensor of Permanent-Magnet Synchronous Machine Drives in Electromechanical Brake. *IEEE Trans. Ind. Electron.* 2015, 62, 1964–1974.
  - [56] Foo, G.H.B.; Zhang, X.; Vilathgamuwa, D.M. A Sensor Fault Detection and Isolation Method in Interior Permanent-Magnet Synchronous Motor Drives Based on an Extended Kalman Filter. *IEEE Trans. Ind. Electron.* 2013, 60, 3485–3495.
  - [57] Sardar, M.U. Analysis of Broken Rotor Bar Diagnostic Techniques for Inverter Fed Induction Motor Faults. In Proceedings of the 22nd International Symposium “Topical Problems in the Field of Electrical and Power Engineering” and “Doctoral School of Energy and Geotechnology III”, Pärnu, Estonia, 23–26 August 2023.
  - [58] Asad, B.; Vaimann, T.; Kallaste, A.; Belahcen, A. Harmonic Spectrum Analysis of Induction Motor with Broken Rotor Bar Fault. In Proceedings of the 2018 IEEE 59th Annual International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering, RTUCON, Riga, Latvia, 12–13 November 2018.
  - [59] Kumar, S.; Mukherjee, D.; Guchhait, P.K.; Banerjee, R.; Srivastava, A.K.; Vishwakarma, D.N.; Saket, R.K. A Comprehensive Review of Condition Based Prognostic Maintenance (CBPM) for Induction Motor. *IEEE Access* 2019, 7, 90690–90704.
  - [60] Dorrell, D.G.; Makhoba, K. Detection of Inter-Turn Stator Faults in Induction Motors Using Short-Term Averaging of Forward and Backward Rotating Stator Current Phasors for Fast Prognostics. *IEEE Trans. Magn.* 2017, 53, 1700107.
  - [61] Devi, N.R.; Siva Sarma, D.V.S.S.; Ramana Rao, P.V. Detection of Stator Incipient Faults and Identification of Faulty Phase in Three-Phase Induction Motor—Simulation and Experimental Verification. *IET Electr. Power Appl.* 2015, 9, 540–548.
  - [62] Tallam, R.M.; Lee, S.B.; Stone, G.C.; Kliman, G.B.; Yoo, J.; Habetler, T.G.; Harley, R.G. A Survey of Methods for Detection of Stator-Related Faults in Induction Machines. *IEEE Trans. Ind. Appl.* 2007, 43, 920–933.
  - [63] Jung, J.; Park, Y.; Lee, S.B.; Cho, C.; Kim, K.; Wiedenbrug, E.; Teska, M. Monitoring of Journal Bearing Faults Based on Motor Current Signature Analysis for Induction Motors. In Proceedings of the 2015 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, ECCE, Montreal, QC, Canada, 20–24 September 2015.
  - [64] Mirzaeva, G.; Saad, K.I. Advanced Diagnosis of Stator Turn-to-Turn Faults and Static Eccentricity in Induction Motors Based on Internal Flux Measurement. *IEEE Trans. Ind. Appl.* 2018, 54, 3961–3970.
  - [65] Halder, S.; Bhat, S.; Dora, B.K. Inverse thresholding to spectrogram for the detection of broken rotor bar in induction motor. *Measurement* 2022, 198, 111400.
  - [66] Kudelina, K.; Vaimann, T.; Rassolkin, A.; Kallaste, A.; Asad, B.; Demidova, G. Induction Motor Bearing Currents-Causes and Damages. In Proceedings of the 2021 28th International Workshop on Electric Drives: Improving Reliability of Electric Drives, IWED, Moscow, Russia, 27–29 January 2021.
  - [67] Shirazian, S.; Alibabaei, M. Using Neural Networks Coupled with Particle Swarm Optimization Technique for Mathematical Modeling of Air Gap Membrane Distillation (AGMD) Systems for Desalination Process. *Neural Comput. Appl.* 2017, 28, 2099–2104.
-



- [68] Halder, S.; Bhat, S.; Zychma, D.; Sowa, P. Broken Rotor Bar Fault Diagnosis Techniques Based on Motor Current Signature Analysis for Induction Motor—A Review. *Energies* 2022, 15, 8569.
- [69] Duque-Perez, O.; Garcia-Escudero, L.A.; Morinigo-Sotelo, D.; Gardel, P.E.; Perez-Alonso, M. Analysis of Fault Signatures for the Diagnosis of Induction Motors Fed by Voltage Source Inverters Using ANOVA and Additive Models. *Electr. Power Syst. Res.* 2015, 121, 1–13.
- [70] Vilhekar, T.G.; Ballal, M.S.; Suryawanshi, H.M. Application of Multiple Parks Vector Approach for Detection of Multiple Faults in Induction Motors. *J. Power Electron.* 2017, 17, 972–982.
- [71] Maouche, Y.; Oumaamar, M.E.K.; Boucherma, M.; Khezzar, A. Instantaneous Power Spectrum Analysis for Broken Bar Fault Detection in Inverter-Fed Six-Phase Squirrel Cage Induction Motor. *Int. J. Electr. Power Energy Syst.* 2014, 62, 110–117.
- [72] Gangsar, P.; Tiwari, R. Signal Based Condition Monitoring Techniques for Fault Detection and Diagnosis of Induction Motors: A State-of-the-Art Review. *Mech. Syst. Signal Process* 2020, 144, 106908
- [73] Zhang, P.; Du, Y.; Habetler, T.G.; Lu, B. A Survey of Condition Monitoring and Protection Methods for Medium-Voltage Induction Motors. *IEEE Trans. Ind. Appl.* 2011, 47, 34–46.
- [74] Lin, C.K.; Liu, T.H.; Yu, J.T.; Fu, L.C.; Hsiao, C.F. Model-Free Predictive Current Control for Interior Permanent-Magnet Synchronous Motor Drives Based on Current Difference Detection Technique. *IEEE Trans. Ind. Electron.* 2014, 61, 667–681.
- [75] Nguyen, V.; Seshadrinath, J.; Wang, D.; Nadarajan, S.; Vaiyapuri, V. Model-Based Diagnosis and RUL Estimation of Induction Machines under Interturn Fault. *IEEE Trans. Ind. Appl.* 2017, 53, 2690–2701.
- [76] Yaghoobi, H.; Arkan, M.; Perović, D.K.; Unsworth, P.; Citation, O.; Chattopadhyay, S.; Mitra, M.; Sengupta, S.; Bengal, W.; Roshanfekr, R.; et al. Motor Current Signature Analysis to Detect Faults in Induction Motor Drives-Fundamentals, Data Interpretation, and Industrial Case Histories. *IEEE Trans. Ind. Electron.* 2017, 13.
- [77] Kudelina, K.; Asad, B.; Vaimann, T.; Rassolkin, A.; Kallaste, A. Production Quality Related Propagating Faults of Induction Machines. In *Proceedings of the 2020 11th International Conference on Electrical Power Drive Systems, ICEPDS, Saint Petersburg, Russia, 4–7 October 2020*.
- [78] Willwerth, A.; Roman, M. Electrical Bearing Damage—A Lurking Problem in Inverter-Driven Traction Motors. In *Proceedings of the 2013 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo: Components, Systems, and Power Electronics—From Technology to Business and Public Policy, ITEC, Metro Detroit, MI, USA, 16–19 June 2013*.
- [79] Kudelina, K.; Vaimann, T.; Asad, B.; Rassolkin, A.; Kallaste, A.; Demidova, G. Trends and Challenges in Intelligent Condition Monitoring of Electrical Machines Using Machine Learning. *Appl. Sci.* 2021, 11, 2761.
- [80] Dong, Z. A Study of Non-Stationary Signal Processing for Machinery Condition Monitoring. Ph.D. Thesis, School of Computing and Engineering, University of Huddersfield, Huddersfield, UK, 2012.
- [81] Leite, V.C.M.N.; Borges Da Silva, J.G.; Veloso, G.F.C.; Borges Da Silva, L.E.; Lambert-Torres, G.; Bonaldi, E.L.; De Lacerda De Oliveira, L.E. Detection of Localized Bearing Faults in Induction Machines by Spectral Kurtosis and Envelope Analysis of Stator Current. *IEEE Trans. Ind. Electron.* 2015, 62, 1855–1865.
- [82] Othman, M.S.; Nuawi, M.Z.; Mohamed, R. Vibration and Acoustic Emission Signal Monitoring for Detection of Induction Motor Bearing Fault. *Int. J. Eng. Res. Technol.* 2015, 4, 924–929.

- [83] Wang, P.P.; Yu, Q.; Hu, Y.J.; Miao, C.X. Online Detection of Broken Rotor Bar Fault in Induction Motors by Combining Estimation of Signal Parameters via Min-Norm Algorithm and Least Square Method. *Chin. J. Mech. Eng. (Engl. Ed.)* 2017, 30, 1285–1295.
- [84] Sapena-Bano, A.; Burriel-Valencia, J.; Pineda-Sanchez, M.; Puche-Panadero, R.; Riera-Guasp, M. The Harmonic Order Tracking Analysis Method for the Fault Diagnosis in Induction Motors under Time-Varying Conditions. *IEEE Trans. Energy Convers.* 2017, 32, 244–256.
- [85] Sabir, H.; Ouassaid, M.; Ngote, N.; Benbouzid, M. A Novel Experimental Method to Detect Early Rotor Faults in Induction Machines. *Int. J. Energy Convers.* 2021, 9, 191.
- [86] Ngote, N.; Guedira, S.; Ouassaid, M.; Cherkaoui, M.; Maaroufi, M. On the Monitoring of Rotor Fault in Induction Machine by the Use of the TSA Method Applied to Stator Current. *Int. Rev. Electr. Eng.* 2012, 7, 4822–4828.
- [87] Ngote, N.; Ouassaid, M.; Guedira, S.; Cherkaoui, M. On the Detection of Induction-Motor Rotor Fault by the Combined “Time Synchronous Averaging-Discrete Wavelet Transform” Approach. *J. Electr. Eng. Technol.* 2015, 10, 2315–2325.
- [88] Dey, S.; Roy, S.S.; Samanta, K.; Modak, S.; Chatterjee, S. Autocorrelation Based Feature Extraction for Bearing Fault Detection in Induction Motors. In Proceedings of the Proceedings—2019 International Conference on Electrical, Electronics and Computer Engineering, UPCON, Aligarh, India, 8–10 November 2019.
- [89] Lu, S.; He, Q.; Yuan, T.; Kong, F. Online Fault Diagnosis of Motor Bearing via Stochastic-Resonance-Based Adaptive Filter in an Embedded System. *IEEE Trans. Syst. Man. Cybern. Syst.* 2017, 47, 1111–1122.
- [90] Braham, A.; Lachiri, Z. Diagnosis of Broken Bar Fault in Induction Machines Using Advanced Digital Signal Processing. *Int. Rev. Electr. Eng.* 2010, 5, 1460–1468.
- [91] Dehina, W.; Boumehraz, M.; Kratz, F. Detectability of Rotor Failure for Induction Motors through Stator Current Based on Advanced Signal Processing Approaches. *Int. J. Dyn. Control* 2021, 9, 1381–1395.
- [92] Granda, D.; Aguilar, W.G.; Arcos-Aviles, D.; Sotomayor, D. Broken Bar Diagnosis for Squirrel Cage Induction Motors Using Frequency Analysis Based on MCSA and Continuous Wavelet Transform. *Math. Comput. Appl.* 2017, 22, 30.
- [93] Climente-Alarcon, V.; Antonino-Daviu, J.A.; Riera-Guasp, M.; Vlcek, M. Induction Motor Diagnosis by Advanced Notch FIR Filters and the Wigner-Ville Distribution. *IEEE Trans. Ind. Electron.* 2014, 61, 4217–4227.
- [94] Kia, S.H.; Henao, H.; Capolino, G.A. A High-Resolution Frequency Estimation Method for Three-Phase Induction Machine Fault Detection. *IEEE Trans. Ind. Electron.* 2007, 54, 2305–2314.
- [95] Martin-Diaz, I.; Morinigo-Sotelo, D.; Duque-Perez, O.; Arredondo-Delgado, P.A.; Camarena-Martinez, D.; Romero-Troncoso, R.J. Analysis of Various Inverters Feeding Induction Motors with Incipient Rotor Fault Using High-Resolution Spectral Analysis. *Electr. Power Syst. Res.* 2017, 152, 18–26.
- [96] Lu, J.; Wang, P.; Duan, S.; Shi, L.; Han, L. Detection of Broken Rotor Bars Fault in Induction Motors by Using an Improved MUSIC and Least-Squares Amplitude Estimation. *Math. Probl. Eng.* 2018, 2018, 5942890.
- [97] Alshorman, O.; Irfan, M.; Saad, N.; Zhen, D.; Haider, N.; Glowacz, A.; Alshorman, A. A Review of Artificial Intelligence Methods for Condition Monitoring and Fault Diagnosis of Rolling Element Bearings for Induction Motor. *Shock. Vib.* 2020, 2020, 8843759.
- [98] Soualhi, A.; Clerc, G.; Razik, H. Detection and Diagnosis of Faults in Induction Motor Using an Improved Artificial Ant Clustering Technique. *IEEE Trans. Ind. Electron.* 2013, 60, 4053–4062.

- [99] Nandi, S.; Ilamparithi, T.; Lee, S.B.; Hyun, D. Pole Pair and Rotor Slot Number Independent Frequency Domain Based Detection of Eccentricity Faults in Induction Machines Using a Semi On-Line Technique. In Proceedings of the 2009 IEEE International Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives, SDEMPED, Cargese, France, 31 August–3 September 2009.
- [100] Di, C.; Bao, X.; Wang, H.; Lv, Q.; He, Y. Modeling and Analysis of Unbalanced Magnetic Pull in Cage Induction Motors with Curved Dynamic Eccentricity. *IEEE Trans. Magn.* 2015, 51, 8106507. [CrossRef]
- [101] Saucedo-Dorantes, J.J.; Delgado-Prieto, M.; Osornio-Rios, R.A.; De Jesus Romero-Troncoso, R. Multifault Diagnosis Method Applied to an Electric Machine Based on High-Dimensional Feature Reduction. *IEEE Trans. Ind. Appl.* 2017, 53, 3086–3097.
- [102] Toma, R.N.; Piltan, F.; Kim, J.M. A Deep Autoencoder-Based Convolution Neural Network Framework for Bearing Fault Classification in Induction Motors. *Sensors* 2021, 21, 8453.
- [103] Yeh, C.C.; Povinelli, R.J.; Mirafzal, B.; Demerdash, N.A.O. Diagnosis of Stator Winding Inter-Turn Shorts in Induction Motors Fed by PWM-Inverter Drive Systems Using a Time-Series Data Mining Technique. In Proceedings of the 2004 International Conference on Power System Technology, POWERCON, Singapore, 21–24 November 2004; Volume 1.
- [104] Romero-Troncoso, R.J.; Saucedo-Gallaga, R.; Cabal-Yepez, E.; Garcia-Perez, A.; Osornio-Rios, R.A.; Alvarez-Salas, R.; Miranda-Vidales, H.; Huber, N. FPGA-Based Online Detection of Multiple Combined Faults in Induction Motors through Information Entropy and Fuzzy Inference. *IEEE Trans. Ind. Electron.* 2011, 58, 5263–5270.
- [105] Akar, M.; Cankaya, I. Broken Rotor Bar Fault Detection in Inverter-Fed Squirrel Cage Induction Motors Using Stator Current Analysis and Fuzzy Logic. *Turk. J. Electr. Eng. Comput. Sci.* 2012, 20, 1077–1089.
- [106] Bozorgi, A.M.; Farasat, M.; Jafarishiadeh, S. Improved Model Predictive Current Control of Permanent Magnet Synchronous Machines with Fuzzy Based Duty Cycle Control. In Proceedings of the ECCE 2016—IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, Milwaukee, WI, USA, 18–22 September 2016.
- [107] Tao, H.; Peng, T.; Yang, C.; Gao, J.; Yang, C.; Gui, W. Voltage and Current Sensor Fault Diagnosis Method for Traction Converter with Two Stator Current Sensors. *Sensors* 2022, 22, 2355.
- [108] Kraleti, R.S.; Zawodniok, M.; Jagannathan, S. Model Based Diagnostics and Prognostics of Three-Phase Induction Motor for Vapor Compressor Applications. In Proceedings of the PHM 2012—2012 IEEE International Conference on Prognostics and Health Management: Enhancing Safety, Efficiency, Availability, and Effectiveness of Systems through PHM Technology and Application, Conference Program, Denver, CO, USA, 18–21 June 2012.
- [109] Jigyasu, R.; Shrivastava, V.; Singh, S. Smart Classifier Based Prognostics and Health Management of Induction Motor. *Mater. Today Proc.* 2020, 43, 355–361
- [110] Lombard, Patrick, Fireteanu, Virgiliu, and Constantin, Alexandru-Ionel. ‘Influences on the Electromagnetic Torque and Rotor Force of Different Faults in Squirrel-cage Induction Motors’. 1 Jan. 2019 : 805 – 815. DOI: 10.3233/JAE-171136
- [111] A. -I. CONSTANTIN, "Detection Based on Stator Current Signature of the Single and Combined Short-Circuit, Broken Bar and Eccentricity Faults in Induction Motors," 2019 11th International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering (ATEE), Bucharest, Romania, 2019, pp. 1-6, doi: 10.1109/ATEE.2019.8724984.
- [112] Altair Flux 3D documentation