

# **UNIVERSITATEA TEHNICĂ DIN CLUJ-NAPOCA**

## **FACULTATEA DE INGINERIE ELECTRICĂ**

### **Implementarea unui Sistem de Propulsie Electrică cu ajutorul unei Mașini de Inducție cu Colivie Rotorică din Cupru**

#### **I. ENUNȚUL TEMEI:**

Implementarea unui Sistem de Propulsie Electrică cu ajutorul unei Mașini de Inducție cu Colivie Rotorică din Cupru

#### **II. CONȚINUTUL proiectului de diplomă**

a) Piese scrise

#### **III. LOCUL DOCUMENTĂRII**

Universitatea Tehnică din Cluj-Napoca, Facultatea de Inginerie Electrică  
Departamentul de Mașini și Acționări Electrice

#### **IV. CONDUCĂTOR ȘTIINȚIFIC:**

Prof. Dr. Ing. FODOREAN DANIEL

V. Data emiterii temei: Decembrie 2021

VI. Termen de predare: 28 iunie 2022

**Conducător științific,**

Prof. Dr. Ing. FODOREAN DANIEL

**Absolvent,**

Sălăjan Bogdan - Ștefan



## Implementarea unui Sistem de Propulsie Electrică cu ajutorul unei Mașini de Inducție cu Colivie Rotorică din Cupru

**Declarație-angajament:** Deoarece acest proiect de diplomă nu ar fi putut fi finalizat(ă) fără ajutorul membrilor departamentului Mașini și Acționări Electrice și a echipamentelor de la departament, mă angajez să public informațiile conținute în lucrare numai cu acordul scris al conducătorului științific și al directorului de departament.

Data: 28 iunie 2022

Semnătura



**Declarație:** Subsemnatul Sălăjan Bogdan – Ștefan declar că am întocmit prezentul proiect de diplomă prin eforturi proprii, fără nici un ajutor extern, sub îndrumarea conducătorului științific și pe baza bibliografiei indicate de acesta.

Data: 28 iunie 2022

Semnătura





**Implementarea unui Sistem de Propulsie Electrică cu ajutorul unei Mașini de  
Inducție cu Colivie Rotorică din Cupru**

**CUPRINS**

<b>INTRODUCERE .....</b>	<b>9</b>
<b>CAPITOLUL 1 – CONSIDERAȚII TEORETICE.....</b>	<b>11</b>
1.1 Generalități despre Mașina de Inducție .....	11
1.2 Alimentarea Mașinii de Inducție .....	13
1.2.1 Invertorul Trifazat .....	13
1.2.2 Controlul Vectorial în buclă închisă.....	14
1.2.3 Encoder.....	15
<b>CAPITOLUL 2 – SOLUȚIA DE PROPULSIE ELECTRICĂ CU MAȘINA DE INDUCȚIE .....</b>	<b>17</b>
2.1 Structura și datele inițiale ale mașinii de inducție cu colivie din cupru .....	17
2.2 Encoderul pentru determinarea poziției rotorului.....	20
2.3 Controlerul Sevcon folosit în alimentarea motorului de inducție cu colivie din cupru.....	21
2.4 Programul DVT.....	24
<b>CAPITOLUL 3 – IMPLEMENTARE ȘI TESTARE PRELIMINARĂ A PROPULSIEI ELECTRICE STUDIAȚE .....</b>	<b>31</b>
3.1 Diagrama bloc de funcționare și alimentare a Mașinii de Inducție .....	31
3.2 Validarea parametrilor mașinii de inducție în simulare numerică.....	33
3.3 Configurarea controlului mașinii de inducție în programul DVT .....	38
3.4 Interacțiune preliminară motor-controler .....	41
<b>CAPITOLUL 4 – REZULTATE EXPERIMENTALE .....</b>	<b>43</b>
4.1 Testarea encoderului.....	43
4.2 Testarea în regim de motor a propulsiei unui Vehicul Electric folosind motorul în studiu .....	43
<b>CAPITOLUL 5 – CONCLUZII .....</b>	<b>48</b>
<b>BIBLIOGRAFIE .....</b>	<b>49</b>



# Implementarea unui Sistem de Propulsie Electrică cu ajutorul unei Mașini de Inducție cu Colivie Rotorică din Cupru

## Lista figurilor

Fig. 1 Emisiile de CO2 împărțite pe categorii de vehicule.....	9
Fig. 2 Componentele principale ale unei mașini de inducție cu colivie rotorică [2]. ....	11
Fig. 3 Construcția mașinii de inducție în secțiune [4]. ....	12
Fig. 4 Invertor trifazat [6]. ....	13
Fig. 5 Metoda directă de control vectorial[13]. ....	15
Fig. 6 Traductor de poziție de tip incremental și absolut [10].....	16
Fig. 7 Secțiunea transversală a mașinii de inducție studiate.....	17
Fig. 8 Configurarea unei faze a mașinii de inducție studiate.....	18
Fig. 9 Configurarea celor 3 faze a mașinii de inducție studiate.....	18
Fig. 10 Distribuirea fazelor pe creștături ..... 18	
Fig. 11 Componentele active ale motorului de inducție studiat ..... 19	
Fig. 12 Traductorul de poziție incremental al mașinii de inducție studiate..... 20	
Fig. 13 Elementele constructive ale traductorului de poziție ..... 20	
Fig. 14 Controlerul Sevcon Gen4..... 21	
Fig. 15 Modelele controlerului Secvon Gen4..... 22	
Fig. 16 Interfața principală a programului DVT..... 24	
Fig. 17 Fereastra CAN din programul DVT..... 25	
Fig. 18 Fereastra de informații din programul DVT..... 25	
Fig. 19 Fereastra cu interfața vehiculului în programul DVT ..... 26	
Fig. 20 Meniul principal în programul DVT ..... 27	
Fig. 21 Meniul pentru configurarea detaliată a parametrilor în programul DVT ..... 27	
Fig. 22 Meniul de cautare a elementelor în programul DVT ..... 28	
Fig. 23 Informațiile controlerului în programul DVT ..... 29	
Fig. 24 Fereastra cu erori în programul DVT ..... 29	
Fig. 25 Setarea modelului mașinii în programul DVT ..... 29	
Fig. 26 Setarea modului de control al motorului în programul DVT ..... 30	
Fig. 27 Fereastra cu limitele de turație în programul DVT ..... 30	
Fig. 28 Fereastra limitelor bateriei în programul DVT..... 30	
Fig. 29 Diagrama bloc de funcționare și alimentare a mașinii de inducție..... 31	
Fig. 30 Implementarea mașinii de inducție studiate în Matlab Simulink ..... 36	
Fig. 31 Graficul pentru cuplu, viteză și randament al mașinii de inducție simulate în programul Matlab Simulink ..... 37	
Fig. 32 Graficul cureților id și iq ai mașinii de inducție simulate în programul Matlab Simulink..... 37	
Fig. 33 Parametrii mașinii de inducție studiate în programul DVT..... 38	



## **Implementarea unui Sistem de Propulsie Electrică cu ajutorul unei Mașini de Inducție cu Colivie Rotorică din Cupru**

Fig. 34 Limitele locale ale mașinii de inducție studiate în programul DVT .....	38
Fig. 35 Limitele de tensiune ale mașinii de inducție studiate în programul DVT .....	39
Fig. 36 Profilul de tracțiune al mașinii de inducție studiate în programul DVT .....	39
Fig. 37 Valorile de tensiune ale contactorului de linie în programul DVT .....	40
Fig. 38 Semnalele de intrare analogice și digitale în programul DVT .....	40
Fig. 39 Specificațiile encoderului în programul DVT .....	40
Fig. 40 Coeficienții regulatorului PI de curent pentru controlul mașinii de inducție studiate în programul DVT.....	41
Fig. 41 Coeficienții regulatorului PI de viteză pentru controlul mașinii de inducție studiate în programul DVT.....	41
Fig. 42 Implementarea sistemului de propulsie în format fizic .....	44
Fig. 43 Funcționarea motorului de inducție la turația de 2500 rpm .....	44
Fig. 44 Funcționarea motorului de inducție la turația de -2000 rpm.....	45
Fig. 45 Graficul vitezei în raport cu timpul a mașinii de inducție studiate .....	45
Fig. 46 Graficul controlului de curent a mașinii de inducție studiate.....	46

### **Lista tabelelor**

Tabel 1 Parametrii geometrici principali a mașinii de inducție studiate .....	17
Tabel 2 Caracteristicile motorului de inducție studiat.....	19
Tabel 3 Pinii traductorului de poziție .....	20
Tabel 4 Componentele constructive ale traductorului de poziție .....	21
Tabel 5 Specificațiile tehnice ale traductorului de poziție .....	21
Tabel 6 Parametrii mașinii de inducție simulați în programul Matlab Simulink .....	33

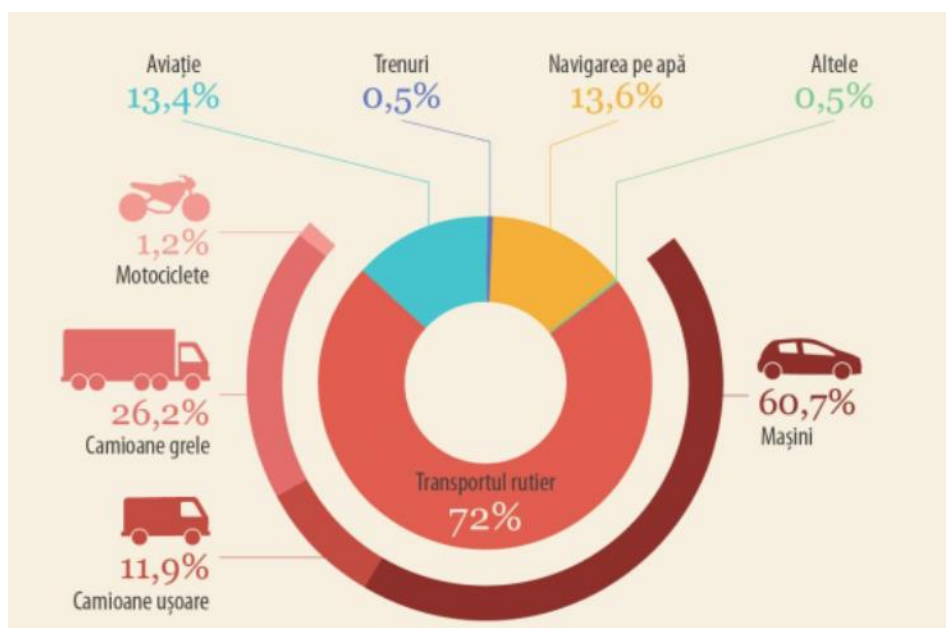






## INTRODUCERE

În această lucrare se abordează tematica propulsiei electrice cu ajutorul unei mașini de inducție cu colivie rotorică din cupru. Subiectul ales, cât și alte lucrări de cercetare cu abordări asemănătoare, apare frecvent în studiile de specialitate, întrucât siguranța sănătății cetățenilor este amenințată de cantitatea emisiilor de carbon produse de propulsia vehiculelor convenționale. Calitatea vieții oamenilor este deteriorată în special în zonele cu aglomerări urbane, astfel până în prezent, autovehiculele cu ardere internă reprezintă sursă principală de poluare a aerului.



*Fig. 1 Emisiile de CO<sub>2</sub> împărțite pe categorii de vehicule.*

Sursă: Agenția Europeană de mediu

Tema aleasă se conturează în jurul dezvoltării unei tehnologii alternative propulsiei automobilului convențional cu combustibili fosili, întrucât resursele de produse petroliere sunt într-o scădere accelerată. Situația globală din prezent impune norme de poluare tot mai stricte, datorită nivelul ridicat al emisiilor de CO<sub>2</sub> (dioxid de carbon), astfel importanța dezvoltării unei tehnologii cu emisii zero este necesară. Renașterea industriei vehiculelor electrice s-a remarcat la începutul secolului XXI cu apariția pe piața a unor noi modele de vehicule “verzi” complet electrice. Aceste vehicule sunt alimentate de la acumulatori și au la baza lor diferite configurații de mașini electrice care antrenează roțile motoare. Primele modele de vehicule electrice au apărut în prima parte a secolului XIX, dar producția propriu-zisă a acestora a apărut doar la începutul anilor 1900. Totodată, datorită lipsei rețelelor electrice și a limitărilor bateriilor de stocare din acea perioadă, vehiculele electrice nu au câștigat prea multă popularitate, însă

## **Implementarea unui Sistem de Propulsie Electrică cu ajutorul unei Mașini de Inducție cu Colivie Rotorică din Cupru**

trenurile electrice dezvoltate au avut un impact pozitiv masiv datorită eficienței acestora dar și vitezelor rezonabile.[1]

Primul capitol este dedicat în totalitate prezentării noțiunilor generale și teoretice ale mașinii de inducție. Capitolul 1 este structurat în 2 părți: definiția și caracteristicile generale ale mașinii de inducție și a doua parte este conturată în jurul alimentării acestei mașini. În mare parte, am definit mașina de inducție ca fiind o mașină de curent alternativ cu 3 faze, care funcționează pe baza fenomenului de inducție electromagnetică. Tot în această secțiune am descris regimurile de funcționare, dar și caracteristicile principale ale acestei mașini bazate pe două ecuații fundamentale. Partea a doua a acestui capitol cuprinde modul de alimentare a mașinii de inducție, modul de control vectorial, dar și traductorul de poziție care interpretează viteza în semnale digitale.

Capitolul 2 cuprinde specificațiile principale și geometrice ale mașinii de inducție, cât și specificațiile encoderului (traductorului de poziție) preluate din datele de catalog ale producătorului. A doua parte a capitolului 2 este dedicată controlerului Sevcon Gen4 (size 4) utilizat pentru alimentarea mașinii de inducție, iar mai apoi este descris programul DVT, adică o interfață a controlerului care ajută utilizatorul să parametrizeze cu ușurință mașina electrică aleasă.

Capitolul 3 descrie funcționalitatea întregului sistem de propulsie electrică studiat în această lucrare cu ajutorul unei diagrame bloc și a programului DVT. Pe lângă acestea, partea de final a capitolului 3 conține interacțiunea preliminară dintre motor și controler, fiind descrise câteva din problemele întâmpinate în momentul alimentării mașinii de inducție.

Capitolul 4, fiind ultimul capitol din această lucrare, cuprinde implementarea sistemului de propulsie electrică utilizând mașina de inducție cu colivie din cupru în format fizic, cât și rezultatele experimentale obținute în urma testării sistemului.



## CAPITOLUL 1 – CONSIDERAȚII TEORETICE

### 1.1 Generalități despre Mașina de Inducție

O mașină de inducție sau mașina asincronă este o mașină electrică de curent alternativ trifazată în care, prin alimentarea înfășurărilor statorice se obține un câmp magnetic învârtitor care prin fenomenul de inducție electromagnetică va induce tensiune electromotoare în conductoarele din rotor. În circuitul închis din rotor se vor forma curenți care vor produce un câmp magnetic în același sens cu cel al câmpului statoric. Interacțiunea dintre cele două câmpuri va pune în mișcare rotorul în sensul de rotație a câmpului magnetic învârtitor.[3]

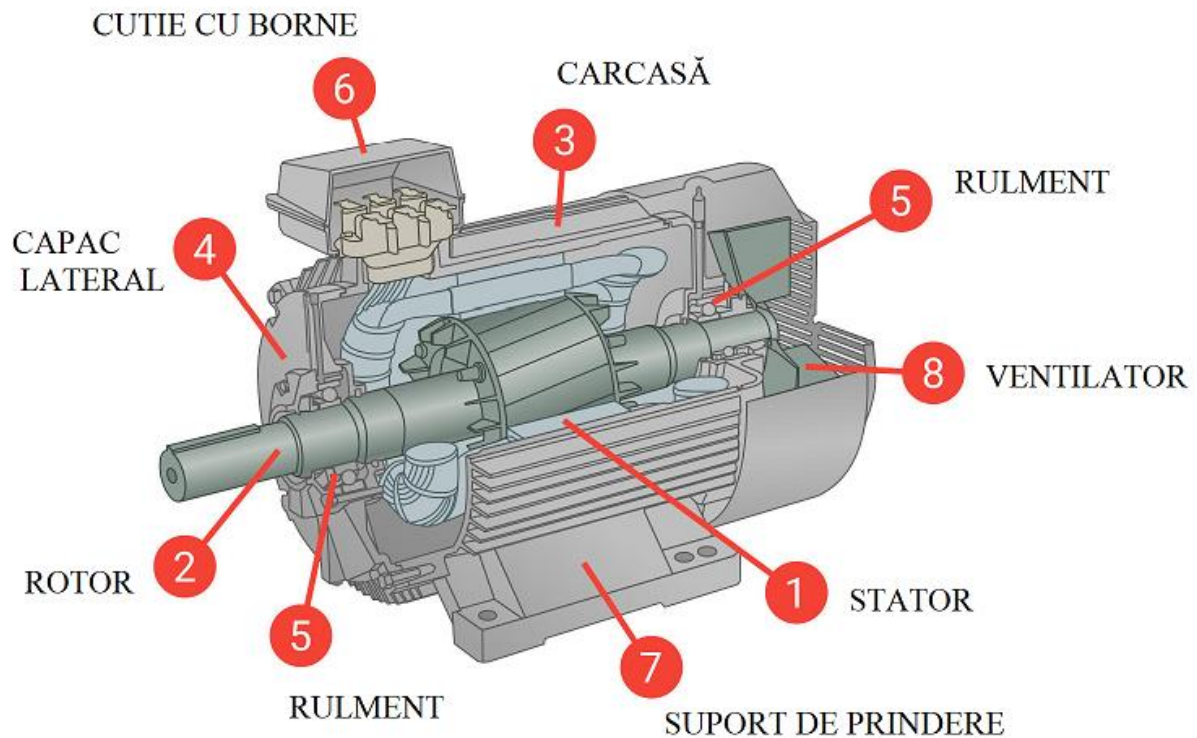


Fig. 2 Componentele principale ale unei mașini de inducție cu colivie rotorică [2].

Mașina asincronă are două regimuri de funcționare: regimul de motor în care energia electrică este transformată în energie mecanică, iar al doilea este regimul de generator care transformă energia mecanică în energie electrică. Mașina este denumită asincronă deoarece turația rotorului este întotdeauna mai mică (în regimul de motor) sau mai mare (în regim de generator) decât turația câmpului magnetic învârtitor, denumită și turația de sincronism [3].



## Implementarea unui Sistem de Propulsie Electrică cu ajutorul unei Mașini de Inducție cu Colivie Rotorică din Cupru

În mașina de inducție turația câmpului magnetic învârtitor este dată de frecvența de alimentare și numărul de perechi de poli care se formează în stator:

$$n_s = \frac{60 \cdot f}{p} \quad (1)$$

Unde:

$n_s$  = turația de sincronism [rpm];

$f$  = frecvența [Hz];

$p$  = numărul de perechi de poli.

O mărime specifică mașinii asincrone este alunecarea. Aceasta este caracterizată prin diferența dintre turația motorului și turația câmpului magnetic învârtitor din stator:

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} \quad (2)$$

Unde:

$s$  = alunecarea;

$n_s$  = turația de sincronism [rpm];

$n$  = turația motorului [rpm].

Modificarea sensului de rotație al rotorului se face prin schimbarea succesiunii fazelor, adică se inversează două faze ale tensiunii de alimentare între ele.

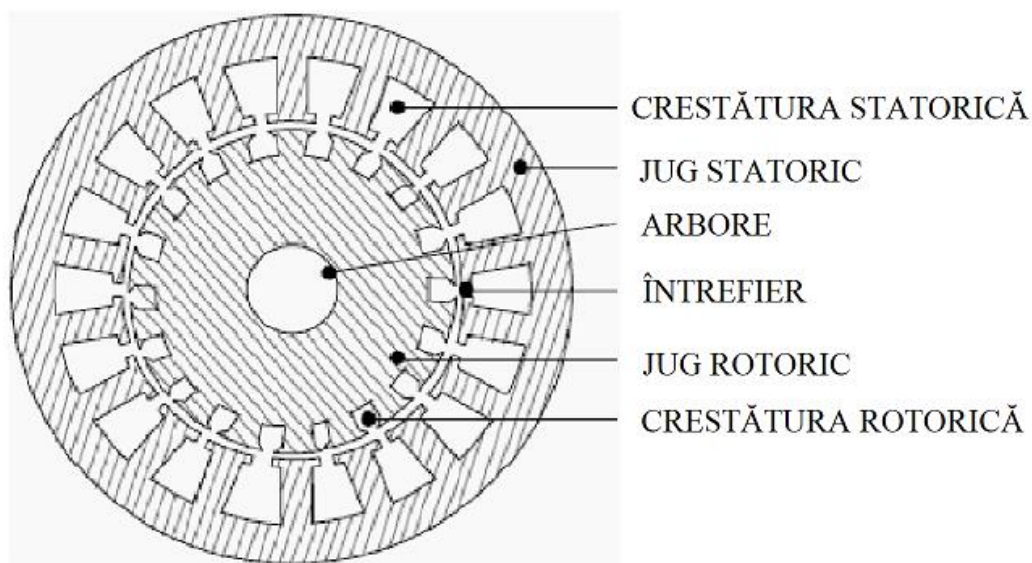


Fig. 3 Construcția mașinii de inducție în secțiune [4].



## Implementarea unui Sistem de Propulsie Electrică cu ajutorul unei Mașini de Inducție cu Colivie Rotorică din Cupru

Rotorul mașinii de inducție studiat este cu colivie de cupru. Acest tip de rotor este compus dintr-un miez din tole de oțel electrotehnic de formă cilindrică și conductori din bare de cupru scurtcircuitate la capete. Avantajele rotorului cu colivie de cupru în comparație cu rotorul cu colivie de aluminiu conform [5] sunt următoarele:

- Cuprul are proprietăți conductoare mai bune decât aluminiul, având o rezistivitate mai mică pentru aceeași dimensiune a secțiunii transversale;
- Cuplu de pornire ridicat pentru curenți de pornire mici;
- Eficiență mai mare;
- Dimensiune mai mică a rotorului din cupru față de cel din aluminiu pentru aceleași performanțe de pornire.

## 1.2 Alimentarea Mașinii de Inducție

### 1.2.1 Invertorul Trifazat

Alimentarea mașinilor de inducție se poate face cu ajutorul unui invertor trifazat. Acest tip de invertor are funcția principală de conversie a curentului continuu de intrare în curent alternativ trifazat la ieșire. Invertorul trifazat de bază include practic 3 comutatoare de invertoare monofazate defazate cu 120 de grade și sunt conectate fiecare la una dintre cele 3 faze [7].

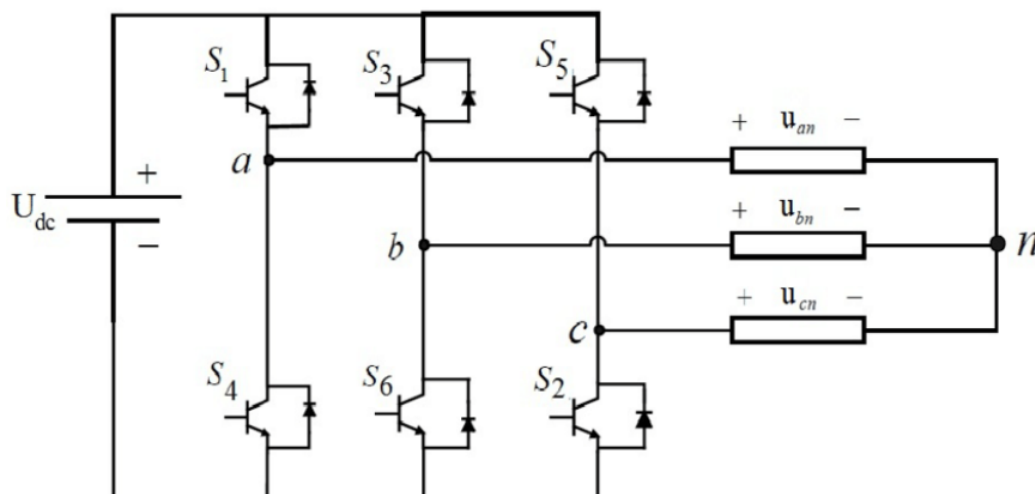


Fig. 4 Invertor trifazat [6].



### **1.2.2 Controlul Vectorial în buclă închisă**

Controlul vectorial, numit și control orientat după câmp (FOC - Field-Oriented Control) este o metodă de control a variației de frecvență (VDF – Variable-frequency drive), în care curenții din stator a unui motor de inducție trifazat sunt identificați ca două componente ortogonale care pot fi vizualizate ca un vector [11].

Controlul vectorial oferă o serie de beneficii, inclusiv controlul vitezei pe o gamă largă, reglarea precisă a vitezei, răspunsul dinamic rapid și funcționarea peste viteza de bază [12].

Algoritmul de control vectorial se bazează pe două idei fundamentale. Prima idee este bazată pe curenții care produc fluxul și cuplul. Un motor de inducție poate fi modelat cel mai simplu (și controlat cel mai simplu) folosind doi curenți în cuadratură, mai degrabă decât curenții familiari trifazați aplicați motorului [13].

Acești doi curenți numiți în axă directă “Id” și respectiv în cuadratură “Iq” sunt responsabili pentru producerea fluxului și a cuplului în motor. Prin definiție, curențul Iq este în fază cu fluxul statorului, iar Id este poziționat la  $90^\circ$  [12].

Dacă tensiunile reale aplicate motorului și curenții rezultați sunt în sistemul familiar trifazat, atunci deplasarea între un sistem de referință staționar și un sistem de referință care se rotește sincron cu fluxul statoric devine dificilă. Acest lucru duce la a doua idee fundamentală din spatele controlului vectorial, adică la ideea sistemelor de referință [13].

Această idee se bazează pe transformarea unei mărimi sinusoidale într-o valoare constantă într-un sistem de referință, care se rotește la aceeași frecvență. Astfel, prin realizarea acestei transformări devine posibil controlul acelei mărimi cu controlere tradiționale de tip proporțional integrator (PI) [13].

Controlul orientat după câmp (FOC) este folosit pentru a controla motoarele de inducție de înaltă performanță, care trebuie să funcționeze pe toată gama de turații, să genereze cuplu complet la turație zero și să aibă performanțe dinamice ridicate, inclusiv accelerare și decelerare rapidă [11].



## Implementarea unui Sistem de Propulsie Electrică cu ajutorul unei Mașini de Inducție cu Colivie Rotorică din Cupru

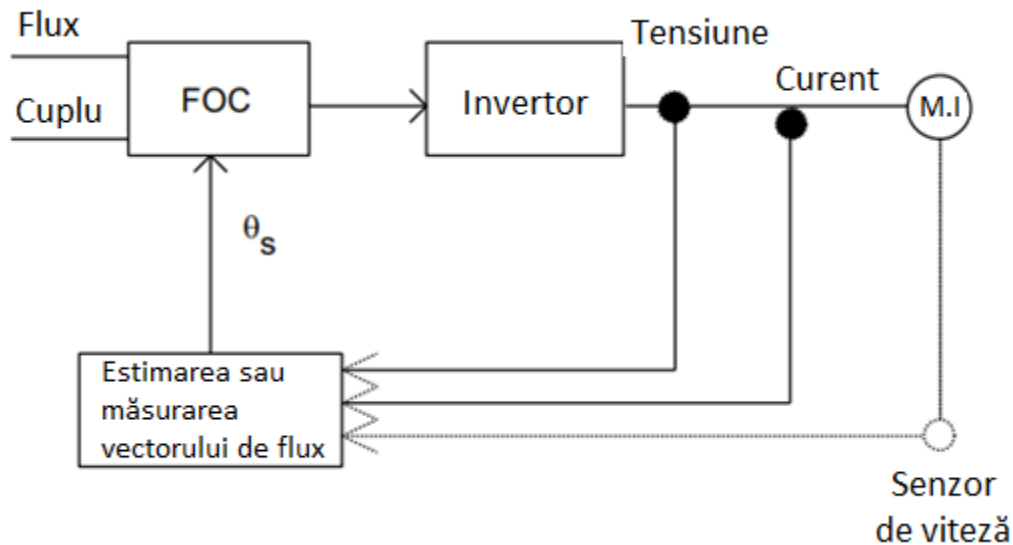


Fig. 5 Metoda directă de control vectorial[13].

Cerințele fundamentale pentru FOC sunt cunoașterea a doi curenți (dacă motorul cu inducție este conectat în stea) și poziția fluxului rotoric. Cunoașterea acestei poziții a fluxului rotorului este esențială pentru această metodă de control. De fapt, dacă există o eroare în această variabilă, fluxul rotorului nu este aliniat cu axa d și componentele curenți sunt estimate incorect[11].

La mașina cu inducție viteza rotorului nu este egală cu viteza câmpului învârtitor statoric (există o alunecare între cele două viteze), ca atare, este necesară o metodă specială pentru calcularea poziției (unghiului) fluxului rotorului[13].

Datorită controlului FOC devine posibil să se controleze, direct și separat, cuplul și fluxul motoarelor de inducție. Mașinile de inducție care utilizează controlul orientat după câmp obțin toate avantajele unei mașini de curent continuu: control instantaneu a vitezei, permițând gestionarea precisă a stării tranzitorii și a stării de echilibru[11].

### 1.2.3 Encoder

Encoder-ul sau traductorul de poziție rotativ este un dispozitiv electromecanic care convertește poziția unghiulară sau mișcarea unui arbore în semnale de ieșire analogice sau digitale. Cu alte cuvinte, encoderul transformă mișcarea mecanică într-un semnal electric care este utilizat de sistemul de control pentru a regla și monitoriza parametrii specifici a unei aplicații. Acest dispozitiv de tip rotativ are o precizie foarte mare și este folosit pentru diferite tipuri de aplicații cu sisteme de control în buclă închisă a vitezei și/sau poziției [8].





## Implementarea unui Sistem de Propulsie Electrică cu ajutorul unei Mașini de Inducție cu Colivie Rotorică din Cupru

Există o mare varietate de configurații de encodere pentru motoare, cum ar fi incrementale sau absolute, optice sau magnetice, cu arbore tubular etc.

Tipul de encoder pentru motor utilizat depinde de mai mulți factori, în special de tipul motorului, de tipul de aplicație care necesită feedback în buclă închisă, dar și de configurația de montare necesară [8].

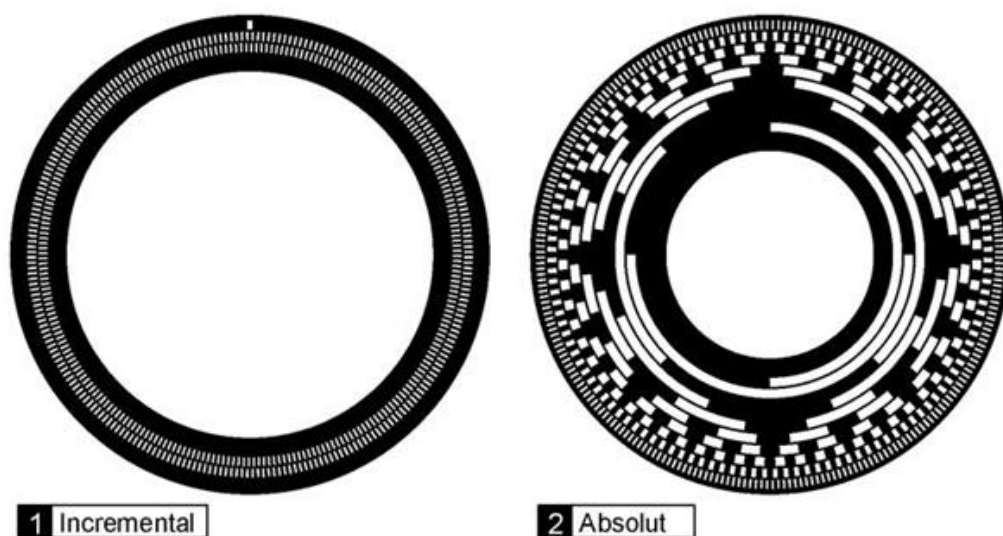


Fig. 6 Traductor de poziție de tip incremental și absolut [10]

Alegerea encoderului este făcută în principiu în funcție de tipul de motor ales în aplicație.

Principalele tipuri de motoare conform [8] sunt:

- Motorul de inducție;
- Servo motorul;
- Motorul pas cu pas;
- Motorul de curent continuu.

Tehnologiile utilizate în traductoarele de poziție sunt împărțite conform [9] în 4 categorii:

- **Encoderele mecanice** sau encoderele conductive folosesc o serie de contacte circumferențiale de cupru gravate pe o placă PCB care codifică informațiile prin perii de contact care detectează zonele conductoare;
- **Encoderele optice** funcționează cu ajutorul unei lumini care este recepționată de fotodioda. Lumina este direcționată prin fantele unui disc de metal sau de sticlă;
- **Encoderele magnetice pe ax** folosesc de obicei un magnet de neodim cu 2 poli magnetizați special, atașat la arborele motorului;
- **Encoderele magnetice în afara axului** utilizează un cauciuc cu mageți de ferită care este atașat unui butuc metalic.





## CAPITOLUL 2 – SOLUȚIA DE PROPULSIE ELECTRICĂ CU MAȘINA DE INDUCȚIE

### 2.1 Structura și datele inițiale ale mașinii de inducție cu colivie din cupru

Mașina de inducție studiată în această lucrare este proiectată cu anumite specificații geometrice (prezentate în fig. 7 și în tabelul 1) pentru a avea un randament cât mai bun de funcționare.

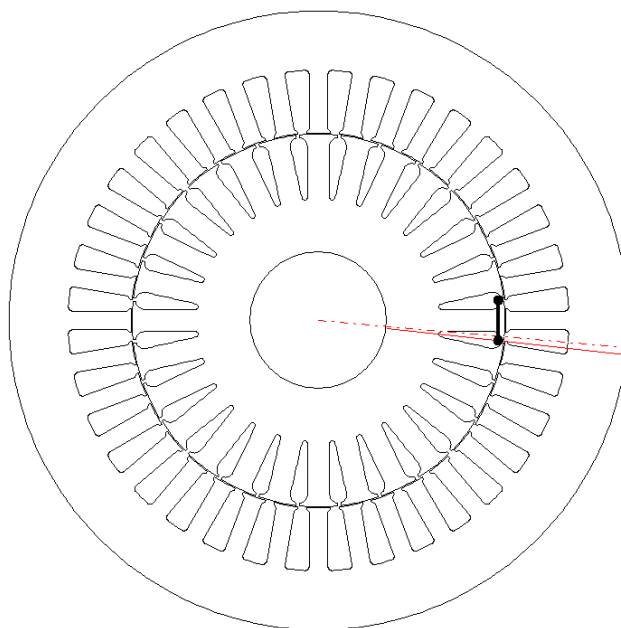


Fig. 7 Secțiunea transversală a mașinii de inducție studiate

Parametru	Unitate	Valoare
Diametrul exterior al statorului	mm	170
Diametrul interior al statorului	mm	103
Lungimea mașinii	mm	150
Întrefier	mm	0.3
Materialul coliviei rotorice		Cupru
Materialul tolelor din stator		M400-50A
Materialul tolelor din rotor		M400-50A
Factorul de umplere în cupru al statorului		0.4
Numărul de spire pe bobină		3
Numărul fazelor		3
Tipul de bobinaj		Distribuit
Conexiunea fazelor		Stea
Numărul creștăturilor statorice		36
Numărul creștăturilor rotorice		28
Perechi de poli		2

Tabel 1 Parametrii geometrici principali a mașinii de inducție studiate



## Implementarea unui Sistem de Propulsie Electrică cu ajutorul unei Mașini de Inducție cu Colivie Rotorică din Cupru

De asemenea, distribuția fazelor pe creștături (prezentate în figurile 8, 9 și 10) are un rol important în funcționarea corectă și performanțele mașinii în toate nivelurile de turație disponibile.

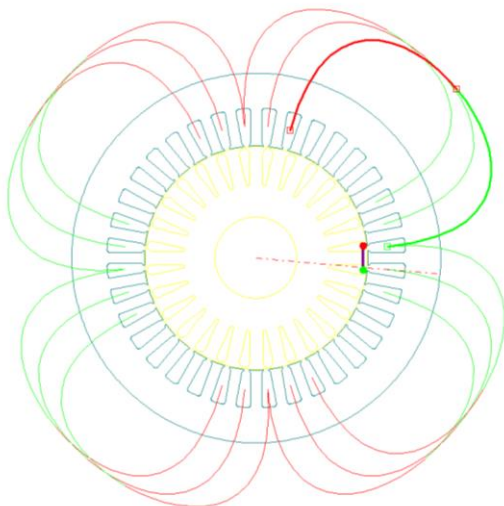


Fig. 8 Configurarea unei faze a mașinii de inducție studiate

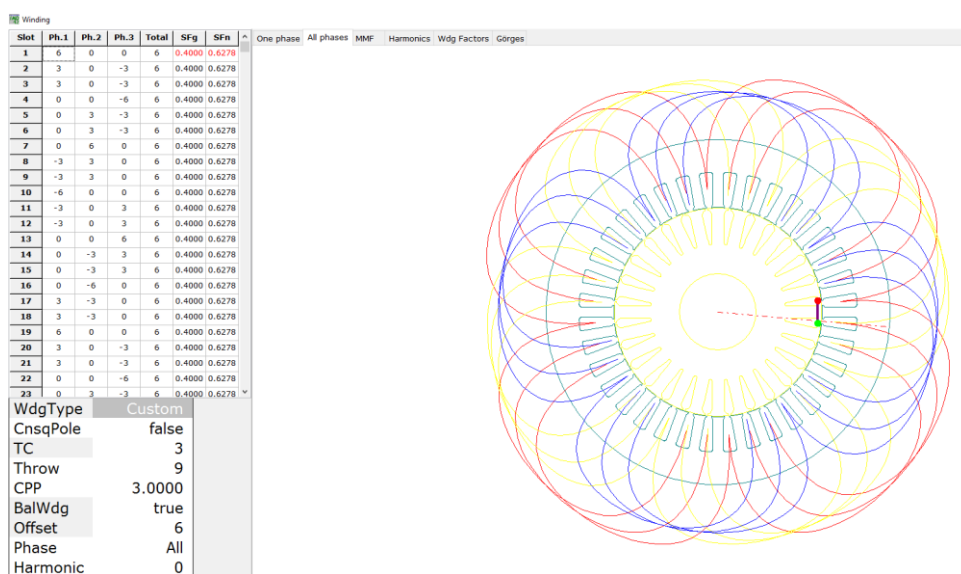


Fig. 9 Configurarea celor 3 faze a mașinii de inducție studiate

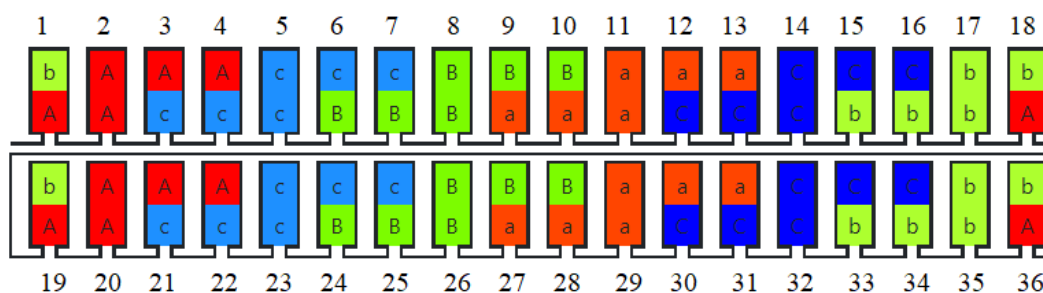


Fig. 10 Distribuția fazelor pe creștături



## Implementarea unui Sistem de Propulsie Electrică cu ajutorul unei Mașini de Inducție cu Colivie Rotorică din Cupru

Caracteristicile și parametrii principali ai mașinii de inducție studiate sunt prezentați în tabelul 2. Acestea sunt datele de catalog provenite de la producător.

Parametru	Unitate	Valoare
Puterea nominală	kW	7.5
Viteza nominală	rpm	2500
Viteza maximă	rpm	9000
Tensiunea	VDC	100
Cuplul de oprire	Nm	28.5
Cuplul maxim	Nm	55
Curentul nominal	Arms	74
Rezistența linie la linie (la 25°C)	$\Omega$	0.12
Inductivitatea linie la linie	mH	2.35
Numărul polilor magnetici		4
Tipul bobinajului		distribuit, 3 faze
Clasa de izolare		F
Metoda de racire		natural

*Tabel 2 Caracteristicile motorului de inducție studiat*

Mașina de inducție studiată este împărțită în 3 componente fizice active, acestea fiind prezentate în figura 11.



(a)



(b)



(c)

*Fig. 11 Componentele active ale motorului de inducție studiat*

*(a) miezul statoric; (b) miezul statoric cu înfășurare; (c) miezul rotoric cu colivia din cupru*

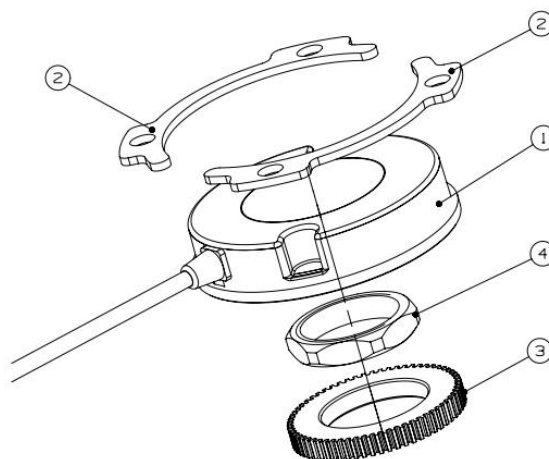


## 2.2 Encoderul pentru determinarea poziției rotorului

Pentru un control variabil și precis al vitezei motorului de inducție studiat, pe arbore a fost montat un encoder (figura 12 și 13), adică un senzor magnetic de viteză cu o rezoluție de 64 de impulsuri pe rotație



*Fig. 12 Traductorul de poziție incremental al mașinii de inducție studiate*



*Fig. 13 Elementele constructive ale traductorului de poziție*

Componentele, specificațiile tehnice dar și diagrama pinilor ale traductorului de poziție studiat sunt preluate din date de catalog de la producător și sunt prezentate în tabelele 3, 4 și 5.

Diagrama pinilor		
PIN 1	Roșu	Alimentare ( + )
PIN 2	Negru	Nul ( - )
PIN 3	Alb	Canalul A
PIN 4	Verde	Canalul B

*Tabel 3 Pinii traductorului de poziție*



## Implementarea unui Sistem de Propulsie Electrică cu ajutorul unei Mașini de Inducție cu Colivie Rotorică din Cupru

Lista componentelor		
	Denumire	Cod
1	Senzor de viteză	E68EC050A01
2	Flanșă de blocare	760EC064A
3	Angrenaj senzor de viteză	762EC069A
4	Piuliță inelară	762EC070A

*Tabel 4 Componentele constructive ale traductorului de poziție*

Tensiunea de alimentare	5V - 24V CC
Impulsuri pe rotație	64
Viteza maximă	6000 RPM
Factor de umplere	50% $\pm$ 25%
Temperatura de operare	-30°C +120°C

*Tabel 5 Specificațiile tehnice ale traductorului de poziție*

### 2.3 Controlerul Sevcon folosit în alimentarea motorului de inducție cu colivie din cupru

Controlerele Sevcon Gen4 sunt proiectate pentru a controla motoarele cu inducție trifazate și motoare de curent alternativ cu magneți permanenți (PMAC) în aplicații de tracțiune și pompe alimentate cu baterie. O gamă de modele este disponibilă pentru a cuprinde un număr mare de aplicații și regimuri de răcire.



*Fig. 14 Controlerul Sevcon Gen4*

Controlerul își adaptează curentul de ieșire pentru a se potrivi condițiilor de încărcare și mediului în care se află în momentul funcționării (închidere automată temporară dacă este necesar). De asemenea, controlerul se va proteja dacă este conectat incorect.

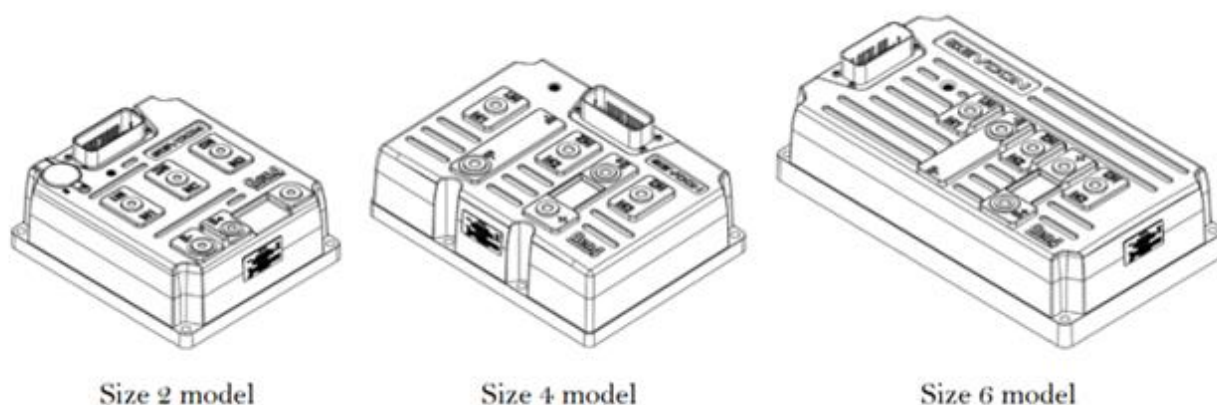


## Implementarea unui Sistem de Propulsie Electrică cu ajutorul unei Mașini de Inducție cu Colivie Rotorică din Cupru

Cablajul de semnal și conexiunile de alimentare au fost concepute pentru a fi pe cât se poate de simplu și direct. Intrările și ieșirile de semnal analogice și digitale sunt prevăzute pentru întrerupătoare, senzori, contactori, supape hidraulice și comunicații CAN. Aceste semnale electrice pot fi configurate la software-ul Gen4 pentru a se potrivi unei game largi de aplicații de tracțiune și pompe.

Configurarea și controlul Gen4 este complet personalizabil folosind receptorul Calibrator al Sevcon sau DVT, un instrument intuitiv de configurare bazat pe Windows. Un singur LED verde este furnizat pentru a oferi o indicație vizuală a stării controlerului.

Controlerul Sevcon Gen4, utilizat pentru alimentarea sistemului de propulsie electrică studiat în această lucrare, este modelul “Size 4”, însă există încă 2 variante constructive, cu diferite configurații de tensiuni și curenți:



*Fig. 15 Modelele controlerului Sevcon Gen4*

Funcția principală a dispozitivului Sevcon Gen4 este de a controla puterea la motorul de inducție cu colivie rotorică trifazată sau a motorului cu magneți permanenți (PMA) în vehicule electrice. Controlul cuplului și al vitezei se face în patru cadrane (cuplul de accelerare și de frânare în direcțiile înainte și înapoi) este posibilă fără a fi nevoie de contactoare direcționale. Frânarea regenerativă este utilizată pentru a recupera energia cinetică care este convertită în energie electrică, depozitată ulterior în baterie.

Într-o aplicație de tracțiune, comenzile de control sunt realizate de către șofer folosind o combinație de comenzi digitale (direcție, pedala picior, comutator pentru detecție șofer etc.) și comenzi analogice (acelerație și frânare). Controlerul oferă toate funcțiile necesare pentru a interpreta comenzile șoferului și pentru a îndeplini cerințele de viteză și cuplu în funcție de parametrii stocați.



## **Implementarea unui Sistem de Propulsie Electrică cu ajutorul unei Mașini de Inducție cu Colivie Rotorică din Cupru**

Semnalele de accelerație pot fi configurate pentru comanda în viteză sau cuplu, cu limite de viteză dependente de accelerație: în fiecare caz, o cerere de cuplu este calculată în mod continuu pentru a ține cont de limitele prestabilite ale nivelului și ratei de schimbare a cuplului. Cererea de cuplu este utilizată pentru a calcula cererile în timp real, adică controlerul calculează ce curenți vor fi necesari în interiorul motorului pentru a genera cuplul necesar.

Există două componente distincte ale curentului, cunoscute sub denumirea de curenți ai axei d-q, care controlează curentul din motor. Curentul pe axa d este responsabil pentru producerea fluxului magnetic (acesta nu va produce cuplu de la sine), iar curentul pe axa q reprezintă curentul care produce cuplu.

Curenții de fază mășurați, cererile de curent  $i_d$  și  $i_q$ , dar și curenții axei d-q sunt utilizați ca parte a unui sistem de control în buclă închisă pentru a calcula cerințele de tensiune necesare pentru fiecare fază a motorului.

Semnalele de tensiune sunt apoi transformate în semnale PWM pentru fiecare fază folosind tehnica modulării vectorului spațial de tensiune (SVM). Această tehnică asigură utilizarea optimă a semiconducătorilor de putere.

Secțiunea de conversie a puterii a controlerului Sevcon Gen4 folosește o punte MOSFET cu 6 comutatoare care funcționează la un nivel eficient de frecvență de 16 kHz sau 24 kHz.

Eficiența electrică și termică excelentă este atinsă prin:

- Minimizarea rezistențelor termice;
- Utilizarea celei mai recente tehnologii MOSFET;
- Protecție termică internă (dacă temperaturile sunt excesive, cuplul de ieșire este redus);
- Protecție la supracurent folosind caracteristicile dispozitivului;
- Măsurarea internă a curentului de ieșire;
- Declanșare la supratensiune în cazul frânării regenerative care ridică tensiunea bateriei la niveluri nesigure.





# Implementarea unui Sistem de Propulsie Electrică cu ajutorul unei Mașini de Inducție cu Colivie Rotorică din Cupru

## 2.4 Programul DVT

Programul DVT, adică Design Verification Test system, este interfața principală a controlerului Sevcon Gen4. Comunicarea dintre cele două este realizată cu ajutorul unui adaptor CAN care poate să transmită date cu frecvențe cuprinse între 10kHz și 1Mhz.

Interfața programului DVT este compusă din mai multe ferestre aranjate într-un mod convenabil pentru a avea o privire de ansamblu asupra tuturor informațiilor importante, cum ar fi: fereastra CAN, fereastra cu informații despre starea și erorile controlerului, meniul de configurare principal, dar și o fereastră cu comenzi și ajutor suplimentar.

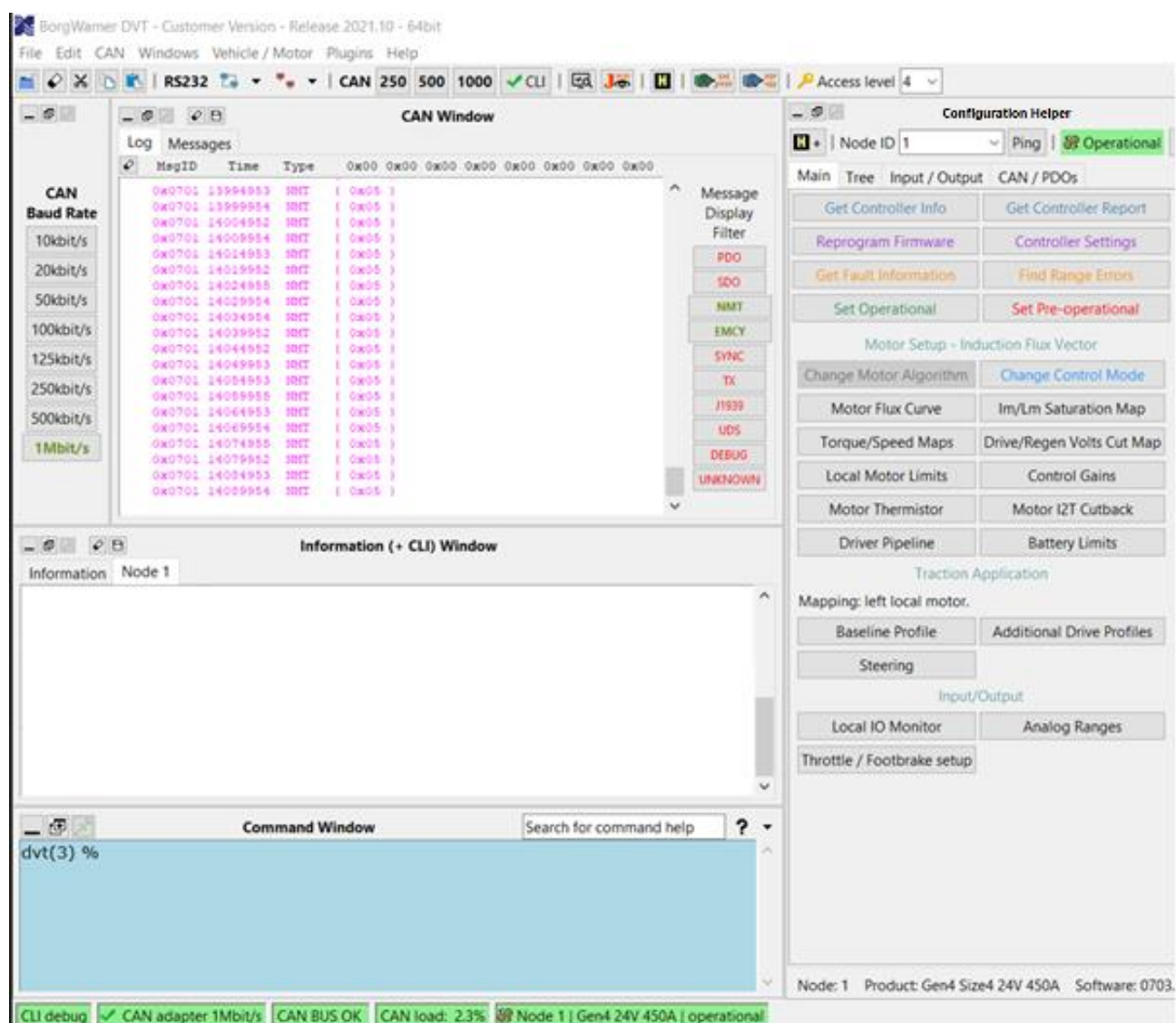


Fig. 16 Interfața principală a programului DVT





## Implementarea unui Sistem de Propulsie Electrică cu ajutorul unei Mașini de Inducție cu Colivie Rotorică din Cupru

Dupa ce s-a realizat conexiunea dintre controler și adaptorul CAN, în fereastra “CAN Window” va apărea traficul de date la fiecare 20ms.

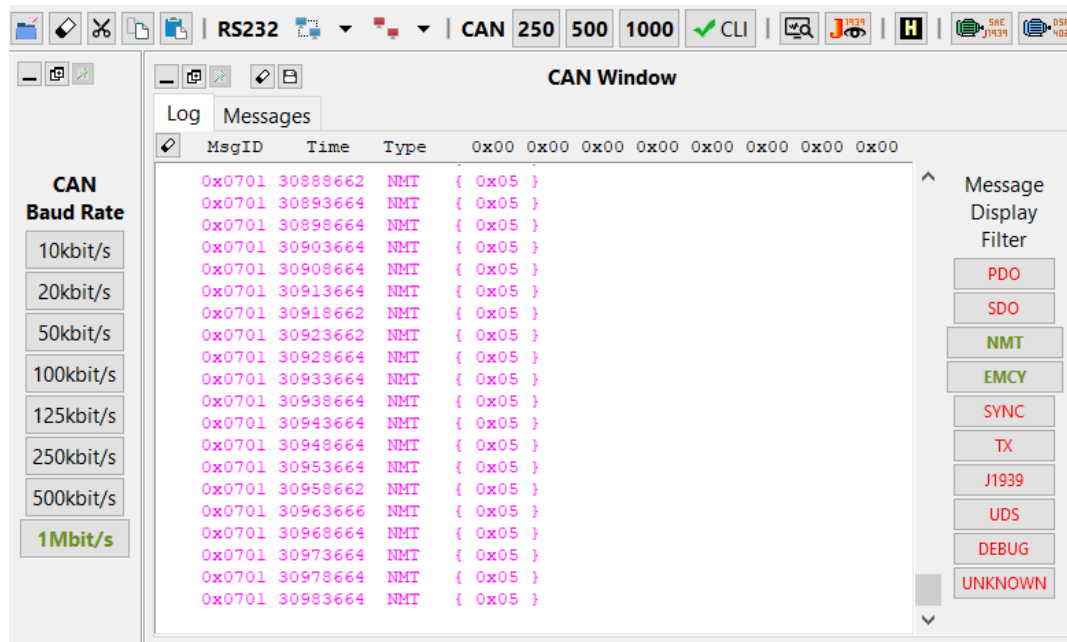


Fig. 17 Fereastra CAN din programul DVT

Fereastra “Information Window” cuprinde o multitudine de informații legate de starea motorului, eventualele erori cu potențialele cauze și posibile rezolvări ale acestora.

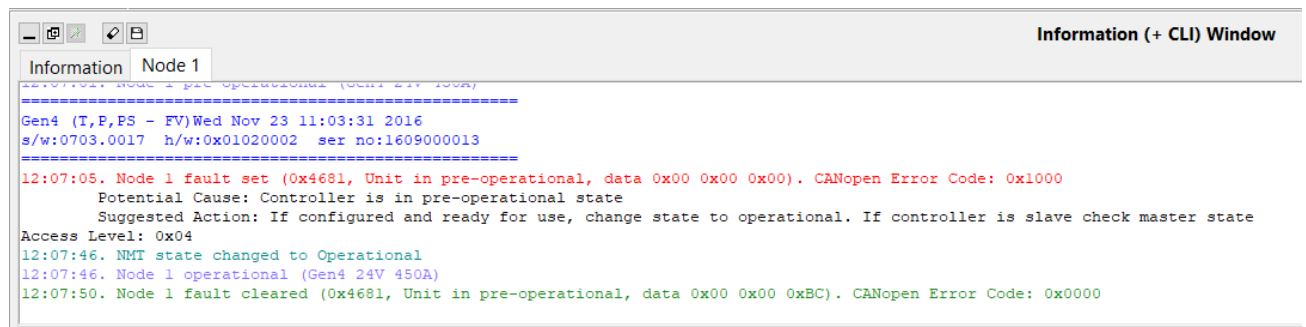


Fig. 18 Fereastra de informații din programul DVT



## Implementarea unui Sistem de Propulsie Electrică cu ajutorul unei Mașini de Inducție cu Colivie Rotorică din Cupru

Interfața vehicului este accesată din bara de instrumente din partea superioară a programului DVT pe butonul “Vehicle/motor”. În această fereastră, utilizatorul poate vizualiza informațiile în timp real ale motorului, cum ar fi: tensiune, curent, temperatură, turație etc.

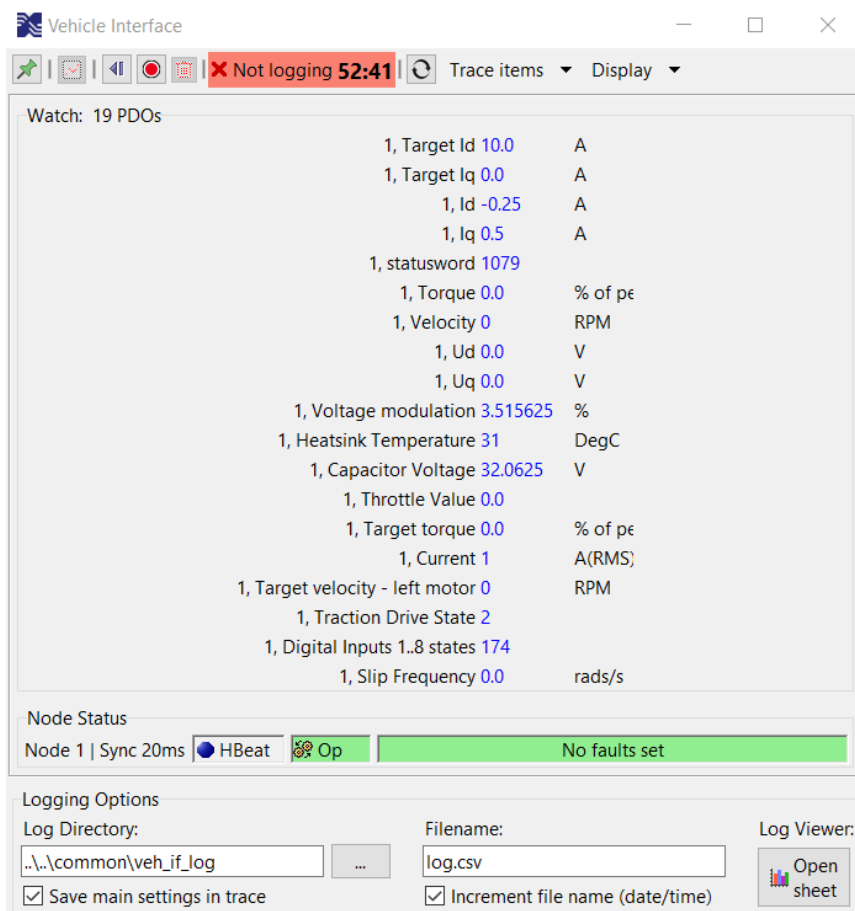


Fig. 19 Fereastră cu interfața vehicului în programul DVT

Aplicația DVT asigură modificarea în timp real a caracteristicilor și parametrilor de intrare, interpretarea eventualelor erori apărute, dar și vizualizarea semnalelor rezultate la ieșire.



## Implementarea unui Sistem de Propulsie Electrică cu ajutorul unei Mașini de Inducție cu Colivie Rotorică din Cupru

Meniul principal “Configuration Helper” cuprinde diferite submeniuri în care se pot face setările pentru controlul motorului, setarea limitelor de tensiune ale bateriei, configurarea componentelor analogice de intrare și ieșire (pedala de accelerație/frânare), verificarea eventualelor erori etc.



Fig. 20 Meniul principal în programul DVT

Meniul “Tree” din fereastra “Configuration Helper” conține diferite submeniuri cu scopul de a putea modifica fiecare parametru în detaliu.

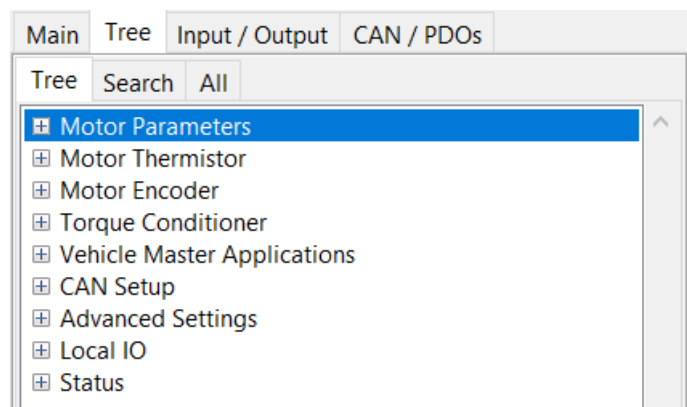


Fig. 21 Meniul pentru configurarea detaliată a parametrilor în programul DVT



## Implementarea unui Sistem de Propulsie Electrică cu ajutorul unei Mașini de Inducție cu Colivie Rotorică din Cupru

De asemenea, în această secțiune se regasește și o fereastră de căutare ”Search” care ajută utilizatorul să găsească într-un timp foarte scurt diferite setări după nume sau chiar după codul în sistem hexazecimal.

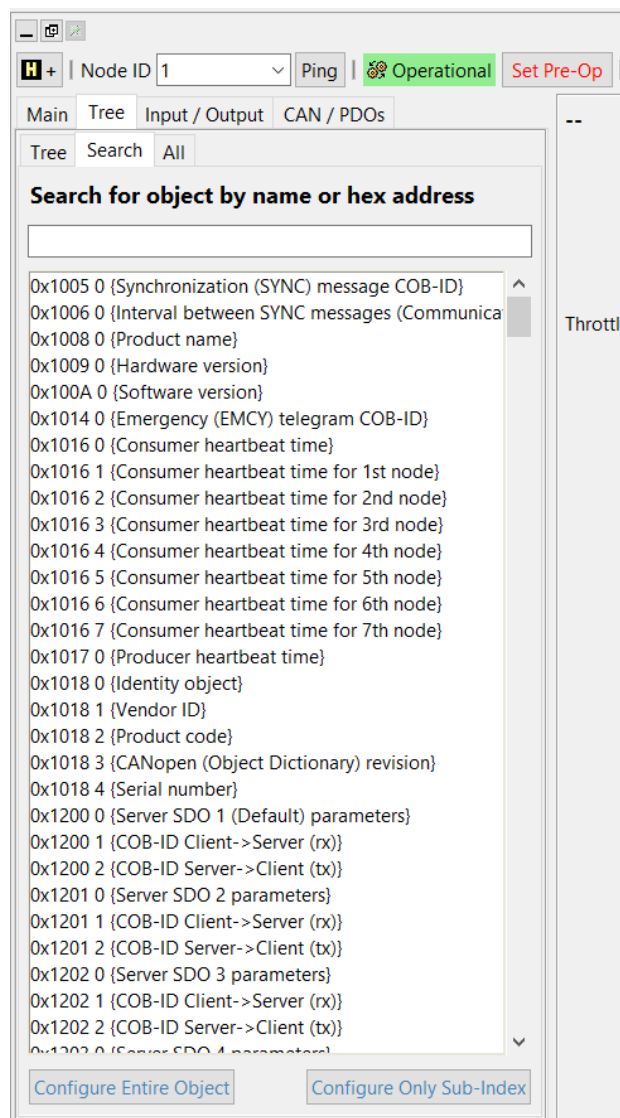


Fig. 22 Meniul de cautare a elementelor în programul DVT

Funcționalitatea aplicației DVT este bazată pe 2 butoane principale:

- **Set Pre-operational** - acest buton este folosit pentru a comuta starea controlerului în modul de așteptare (stand-by). În acest mod se pot realiza toate setările controlerului la nivel de aplicație, fără a transmite direct semnalele de intrare prin adaptorul CAN.
- **Set Operational** - acest buton este utilizat doar în momentul în care s-au realizat toate setările necesare și va comuta controlerul în modul “pregatit de condus”.



## Implementarea unui Sistem de Propulsie Electrică cu ajutorul unei Mașini de Inducție cu Colivie Rotorică din Cupru

Informațiile principale hardware și software ale controlerului sunt afișate apăsând pe butonul **Get Controller Info**, astfel va apărea următoarea imagine:

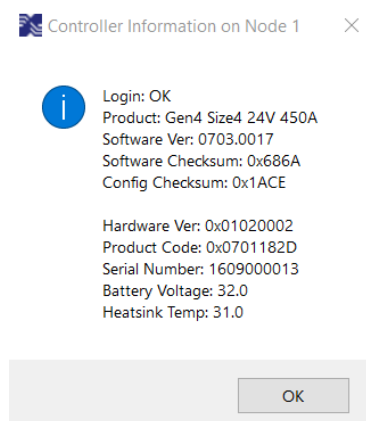


Fig. 23 Informațiile controlerului în programul DVT

Acționând butonul **Get Fault Information** programul DVT va afișa o fereastră cu toate codurile de erori existente, dar și o mică descriere a acestora pentru a ajuta utilizatorul să detecteze cât mai ușor problemele.

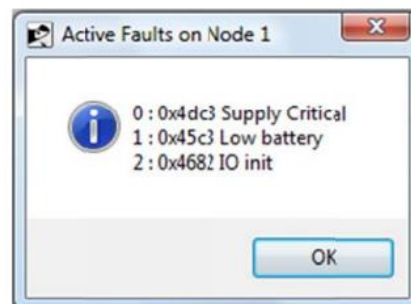


Fig. 24 Fereastra cu erori în programul DVT

Butonul **Controller Settings** permite salvarea sau încărcarea unui fișier cu extensia “.dcf” a tipului de mașina utilizat (ex: mașina de inducție, mașina cu magneți permanenți)

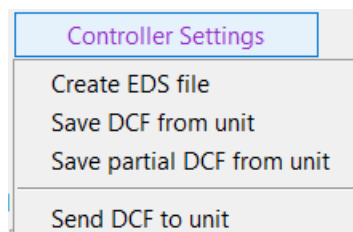


Fig. 25 Setarea modelului mașinii în programul DVT



## Implementarea unui Sistem de Propulsie Electrică cu ajutorul unei Mașini de Inducție cu Colivie Rotorică din Cupru

Butonul **Change Control Mode** este utilizat pentru modificarea controlului motorului în 2 tipuri: control în cuplu sau control în viteză.

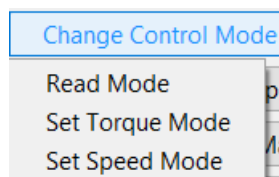


Fig. 26 Setarea modului de control al motorului în programul DVT

În fereastra, deschisă de butonul **Baseline Profile**, se limitează turația motorului la regimul de mers înainte și mers înapoi.

Maximum Speed in forward direction	5000.0	rpm
Maximum Speed in reverse direction	2000.0	rpm

Fig. 27 Fereastra cu limitele de turație în programul DVT

Butonul **Battery Limits** deschide o fereastră care permite modificarea limitelor tensiunii bateriei. Această fereastră conține și un grafic pentru a putea înțelege cu ușurință modificările făcute.

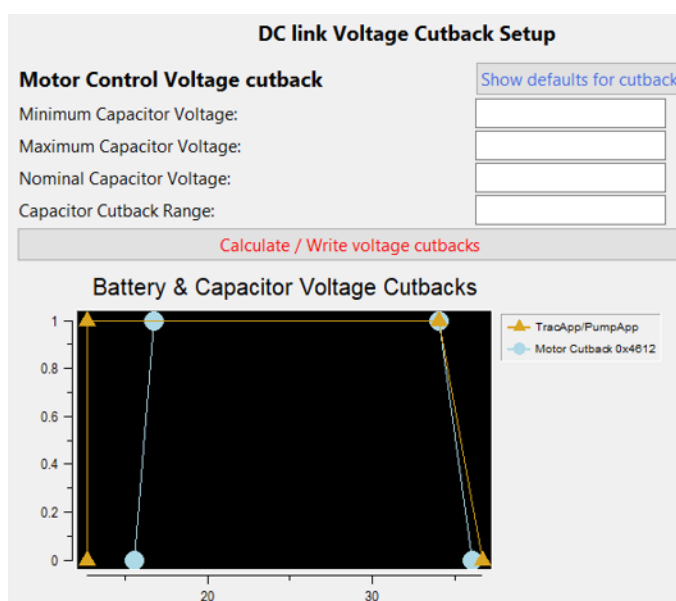


Fig. 28 Fereastra limitelor bateriei în programul DVT

Instalarea pedalelor de accelerație sau frânare se face cu ajutorul butonului **Throttle / Footbrake setup**. După apăsarea acestui buton, utilizatorul trebuie să acționeze pedala până la capăt pentru ca programul DVT să poată înregistra toată cursa pedalei.



## CAPITOLUL 3 – IMPLEMENTARE ȘI TESTARE

### PRELIMINARĂ A PROPULSIEI ELECTRICE STUDIATE

#### 3.1 Diagrama bloc de funcționare și alimentare a Mașinii de Inducție

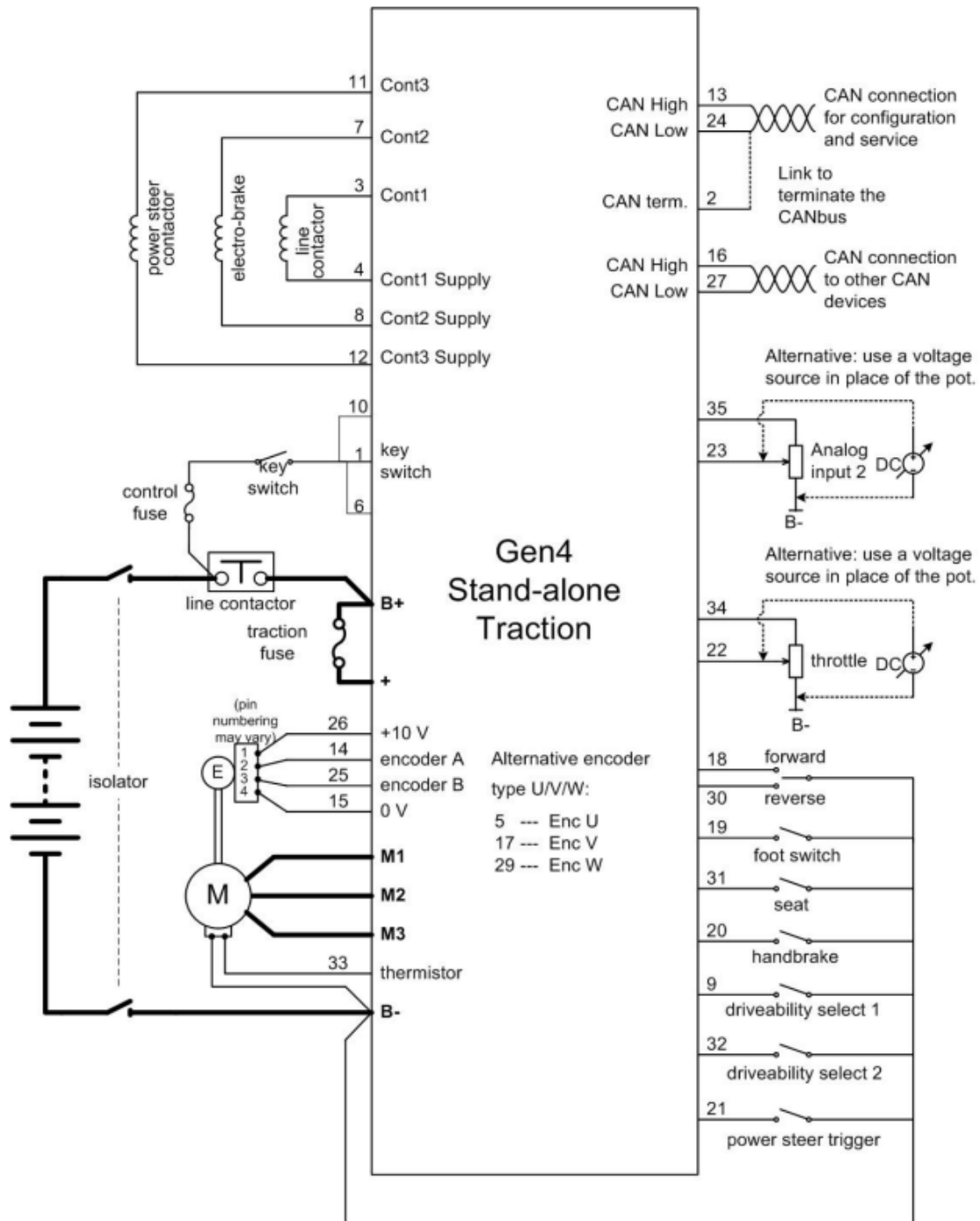


Fig. 29 Diagrama bloc de funcționare și alimentare a mașinii de inducție



## Implementarea unui Sistem de Propulsie Electrică cu ajutorul unei Mașini de Inducție cu Colivie Rotorică din Cupru

Funcționarea întregului sistem de propulsie electrică începe prin alimentarea controlerului Sevcon Gen4 (size 4) prin contactorul principal de linie. De fapt, borna cu potențial pozitiv a bateriei se conectează la contactorul de linie, iar borna de potențial negativ a bateriei se conectează direct la borna "B-" a controlerului (întrerupătorul "isolator" din schema de mai sus nu a fost folosit, deoarece în lucrarea de față nu s-a utilizat ca sursă de alimentare o baterie de putere, ci o sursă programabilă; în realitate, acest întrerupător este manual și este folosit pentru izolarea bateriei de restul circuitului). Tensiunea de alimentare a bateriei în cazul nostru (impus de controler) este de 32Vcc.

Tot la borna de potențial pozitiv a sursei se conectează și comutatorul principal (cheia), care prin intermediul unei siguranțe de 2A permite transferul potențialului pozitiv la controler. Astfel, se asigură necesarul de tensiune pentru controler, la **PINUL 1** (care este legat intern cu **PINUL 10** și **PINUL 6** al controlerului). Prin urmare, bobina contactorului de linie se alimentează la tensiunea sursei (32V) folosind **PINUL 4** ( + ) și **PINUL 3** ( - ). Protecția sistemului de tracțiune este asigurată de o siguranță de 425A.

Comunicația dintre controlerul Sevcon și programul DVT este asigurată de un adaptor CAN care este conectat cu borna de "CAN HIGH" pe **PINUL 13**, iar borna de "CAN LOW" este conectată la **PINUL 24** (și **PINUL 2** – legătură externă). Cablurile adaptorului CAN sunt torsadate pentru a elimina interferențele electromagnetice.

**IMPORTANT:** controlerul SEVCON funcționează numai cu un anumit tip de convertor CAN, cu conversie USB, având denumirea: **IXXAT USB-to-CAN 1.01.0281.11001**.

Mașina de inducție trifazată (M) are cele 3 faze conectate pe bornele controlerului **M1**, **M2** și **M3**. Această mașina are de asemenea un traductor de poziție (de tip Encoder) cu 4 pini, folosiți la alimentare (**26, 15**) și pentru indicarea poziției rotorului (**25, 14**).

Accelerarea motorului de inducție se face cu ajutorul unei pedale, adică un potențiometru de 5k $\Omega$  care are valoarea de 0 $\Omega$  conectată la borna "B-", valoarea maximă de 5 $\Omega$  la conectată la **PINUL 34**.

De asemenea, **PINUL 22** este utilizat pentru variația tensiunii corespunzătoare accelerației (denumit "wiper" în schema de control de mai sus).

Modurile de funcționare ale motorului sunt asigurate de 4 comutatoare având o bornă negativă comună, aceasta fiind conectată la "B-" prin comutatoarele amintite (succesiunea





## Implementarea unui Sistem de Propulsie Electrică cu ajutorul unei Mașini de Inducție cu Colivie Rotorică din Cupru

conectării lor în circuit trebuind să fie similar modului de oparare al controlerului), celelalte borne ale comutatoarelor fiind conectate pe următorii pini:

- **PINUL 18** și **PINUL 30** sunt conectați la un comutator cu 3 poziții pentru a impune motorului direcția de mers înainte sau înapoi;
- **PINUL 19** utilizat pentru un comutator cu rolul de a activa pedala de accelerație;
- Comutatorul de pe **PINUL 31** este un comutator care confirmă prezența unui utilizator pe scaunul conducătorului vehiculului;
- Comutatorul de pe **PINUL 9** asigură utilizarea motorului de inducție într-un mod de funcționare personalizat de conducere.

Sucesiunea conectării pinilor prin comutatoare, după interfațarea cu software-ul DVT, este esențială pentru punerea în funcțiune a sistemului de propulsie, utilizatorul trebuind să utilizeze următoarea ordine: primul pas este comutarea butonului “SCAUN” de pe PINUL 31 pe poziția “ON”, după care este necesară punerea în funcțiune a comutatorului “MOD DE CONDUCERE” de pe PINUL 9. Impunerea direcției de mers este asigurată de comutatorul cu PINUL 18 pentru mersul înainte sau PINUL 30 pentru mersul înapoi, după care este acționat butonul “COMUTATOR PEDALĂ” pentru ca sistemul de propulsie să fie pregătit pentru accelerare.

### 3.2 Validarea parametrilor mașinii de inducție în simulare numerică

Pentru validarea parametrilor mașinii de inducție, avem posibilitatea testării experimentale în vederea determinării acestora, sau folosind o simulare în regim dinamic. Am optat pentru a doua variantă, astfel că, implementând controlul vectorial al motorului de inducție în programul Matlab Simulink, am putut valida (rezistențele și inductanțele) și estima (pentru coeficientul de vâscozitate și inerție) parametrii mașinii. În continuare se prezintă parametrii folosiți în simulare:

Parametru	Valoare	Unitate
Rezistența de fază statorică	0.0052	Ohm
Rezistența rotorică	0.006	Ohm
Inductanța ciclică statorică	0.0011	Henry
Inductanța ciclică rotorică	0.0011	Henry
Inductanța de scăpări statorică	$5.8750 * 10^{-5}$	Henry
Inductanța de scăpări rotorică	$5.8750 * 10^{-5}$	Henry
Inerția	0.2071	$Kg * m^2$
Coeficientul de frecări vâscoase	0.00011	$Nm * s/rad$

*Tabel 6 Parametrii mașinii de inducție simulați în programul Matlab Simulink*

Modelul matematic al mașinii de inducție implementat în simularea Matlab Simulink s-a realizat în baza ecuațiilor de tensiuni, fluxuri, cuplu și ecuația dinamică a mișcării preluate din [14]:



## Implementarea unui Sistem de Propulsie Electrică cu ajutorul unei Mașini de Inducție cu Colivie Rotorică din Cupru

**Ecuatiile de fluxuri statorice și rotorice:**

$$\frac{d}{dt} \Phi_{sd} = u_{sd} + \omega_s * \Phi_{sq} - R_s * i_{sd} \quad (3)$$

$$\frac{d}{dt} \Phi_{sd} = u_{sd} + \omega_s * \Phi_{sq} - R_s * i_{sd} \quad (4)$$

$$\frac{d}{dt} \Phi_{sd} = u_{sd} + \omega_s * \Phi_{sq} - R_s * i_{sd} \quad (5)$$

$$\frac{d}{dt} \Phi_{sd} = u_{sd} + \omega_s * \Phi_{sq} - R_s * i_{sd} \quad (6)$$

Unde:

$R_s$  și  $R_r$  – rezistența statorică și rotorică a mașinii;

$L_s$  și  $L_r$  – inductanțele ciclice statorice și rotorice;

$\Phi_{sd}$ ,  $\Phi_{sq}$ ,  $\Phi_{rd}$  și  $\Phi_{rq}$  – fluxurile statorice și rotorice;

$\omega_s$  – viteza câmpului statoric;

$\omega_{sr}$  – viteza câmpului rotoric.

**Relațiile dintre curent și fluxuri:**

$$\Phi_{sd} = L_s * i_{sd} + M * i_{rd} \quad (7)$$

$$\Phi_{sq} = L_s * i_{sq} + M * i_{rq} \quad (8)$$

$$\Phi_{rd} = L_r * i_{rd} + M * i_{sd} \quad (9)$$

$$\Phi_{rq} = L_r * i_{rq} + M * i_{sq} \quad (10)$$

Unde:

$M$  – inductanța mutuală ciclică dintre stator și rotor.

**Ecuția de cuplu:**

$$T_{em} = p * \frac{M}{L_r} (i_{sq} * \Phi_{rd} - i_{sd} * \Phi_{rq}) \quad (11)$$

Unde:

$T_{em}$  – cuplul electromagnetic.



## Implementarea unui Sistem de Propulsie Electrică cu ajutorul unei Mașini de Inducție cu Colivie Rotorică din Cupru

Ecuatia dinamică a mișcării:

$$J * \frac{d\Omega}{dt} = T_{em} - B * \Omega - T_s \quad (12)$$

Unde:

$\Omega$  – viteza mecanică a mașinii;

J – inerția;

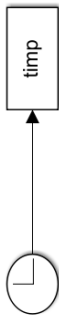
B – coeficientul de frecări vâscoase;

$T_s$  – cuplul de frecare.

Modelul de simulare al controlului mașinii de inducție cu colivie din cupru este prezentat în figura 30, iar rezultatele simulării în figurile 31 și 32. Se poate observa că, la apelul de viteză avem un cuplu de accelerare corespunzător, imaginea acestui cuplu regăsindu-se în curentul în cuadratură. La 3 secunde se aplică un cuplu de sarcină (nominal) și se observă că viteza este menținută în continuare la valoarea de referință solicitată, iar randamentul atinge valoarea nominală.



## Inducție cu Colivie Rotorică din Cupru



*Fig. 30 Implementarea mașinii de inducție studiate în Matlab Simulink*

## Implementarea unui Sistem de Propulsie Electrică cu ajutorul unei Mașini de Inducție cu Colivie Rotorică din Cupru

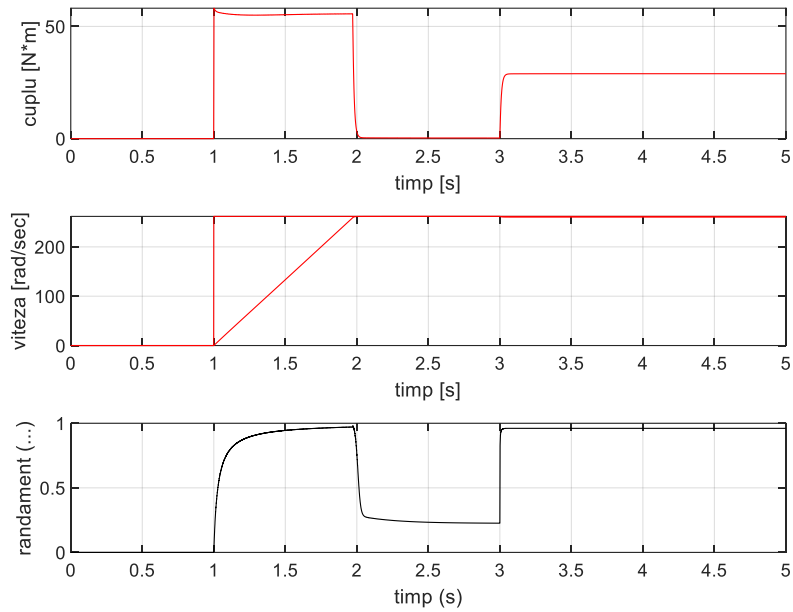


Fig. 31 Graficul pentru cuplu, viteză și randament al mașinii de inducție simulate în programul Matlab Simulink

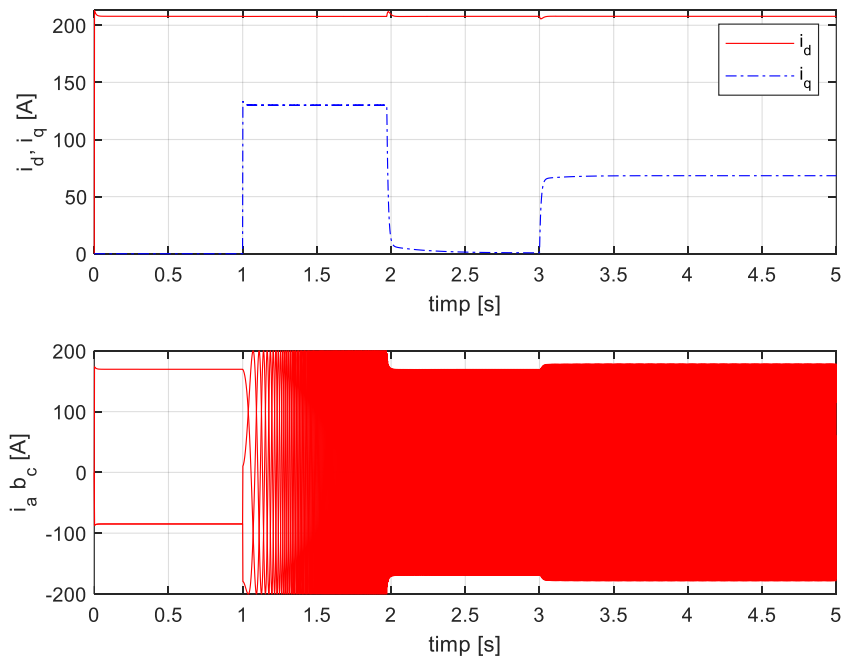


Fig. 32 Graficul cureșilor  $i_d$  și  $i_q$  ai mașinii de inducție simulate în programul Matlab Simulink



## Implementarea unui Sistem de Propulsie Electrică cu ajutorul unei Mașini de Inducție cu Colivie Rotorică din Cupru

### 3.3 Configurarea controlului mașinii de inducție în programul DVT

În urma simulării controlului mașinii de inducție în Matlab Simulink, parametrii rezultați au fost introduși în interfața controlerului Sevcon Gen4, adică în programul DVT conform figurii 33.

AC Motor data [0x4641]		
Motor data. This is specific to the motor type.		
Maximum Stator Current (Is max)	200.0	A(RMS)
Minimum Magnetizing Current (Im min)	10.0	A(RMS)
Number of Pole Pairs (npp)	2.0	
Stator Resistance (Rs)	59.814453125	mOhms
Rated Stator Current	74.0	A(RMS)
Rotor Resistance (Rr)	39.794921875	mOhms
Magnetizing Inductance (Lm)	1174.9267578125	uH
Stator Leakage Inductance (Lls)	58.17413330078125	uH
Rotor Leakage Inductance (Llr)	58.17413330078125	uH
Nominal battery voltage	32.0	V
Current control proportional gain (Kp)	0.00048828125	
Current control integral gain (Ki)	0.04998779296875	
Reactive Gain Boost	0.0	Henry
Voltage Constant (Ke)	0.0	V/rads
Im rated	64.6875	A
Maximum drive slip	130.0	rad/s
Maximum brake slip	130.0	rad/s
Openloop start speed	28647.889756541157	rpm
Openloop exit speed	28647.889756541157	rpm
Frequency / Mod index control Kp	0.00079345703125	
Frequency / Mod index control Ki	0.00701904296875	
Slip control Ki	0.0	
Max drive mod index	94.9951171875	%
Max brake mod index	85.009765625	%
Ls/Ls'	2.5	

Read Values Write Values

Algorithm: Induction Flux Vector - Speed Mode

Fig. 33 Parametrii mașinii de inducție studiate în programul DVT

Limitele locale ale mașinii de inducție sunt reprezentate în figura 34. Acestea sunt introduse în programul DVT conform specificațiilor preluate din datele de catalog ale producatorului.

Maximum torque	0.0	% of peak
Torque slope	6553.5	% rated/s
Current limit	200.0	A(RMS)
Peak torque	55.0	Nm
Maximum motor speed	9000.0	RPM
Maximum acceleration rate	10000.0	rpm/s
Motor overspeed protection	10000.0	rpm

Read Values Write Values

Fig. 34 Limitele locale ale mașinii de inducție studiate în programul DVT



## Implementarea unui Sistem de Propulsie Electrică cu ajutorul unei Mașini de Inducție cu Colivie Rotorică din Cupru

Funcționarea corectă a sistemului de propulsie electrică este asigurat de valoarea nominală și limitele de tensiune ale bateriei. Astfel, tensiunea nominală de funcționare este la 32V, conform figurii 35.

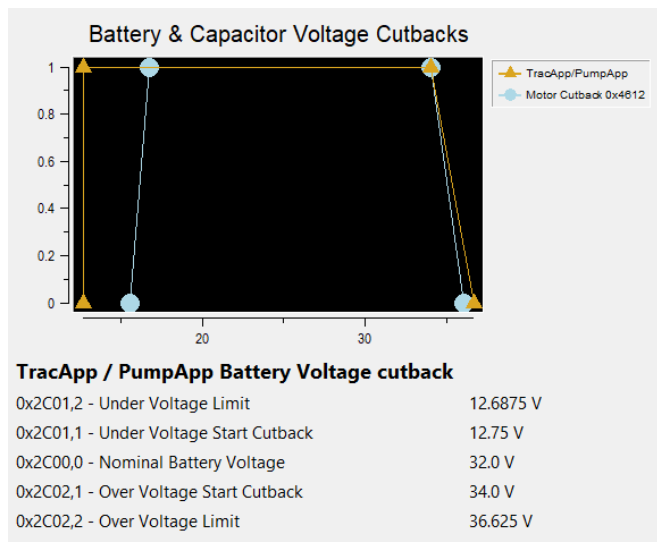


Fig. 35 Limitele de tensiune ale mașinii de inducție studiate în programul DVT

Profilul de tracțiune al mașinii de inducție studiat limitează turația maximă la cele două direcții de mers: înainte și înapoi. Aceste limitări se pot vizualiza în figura 36.

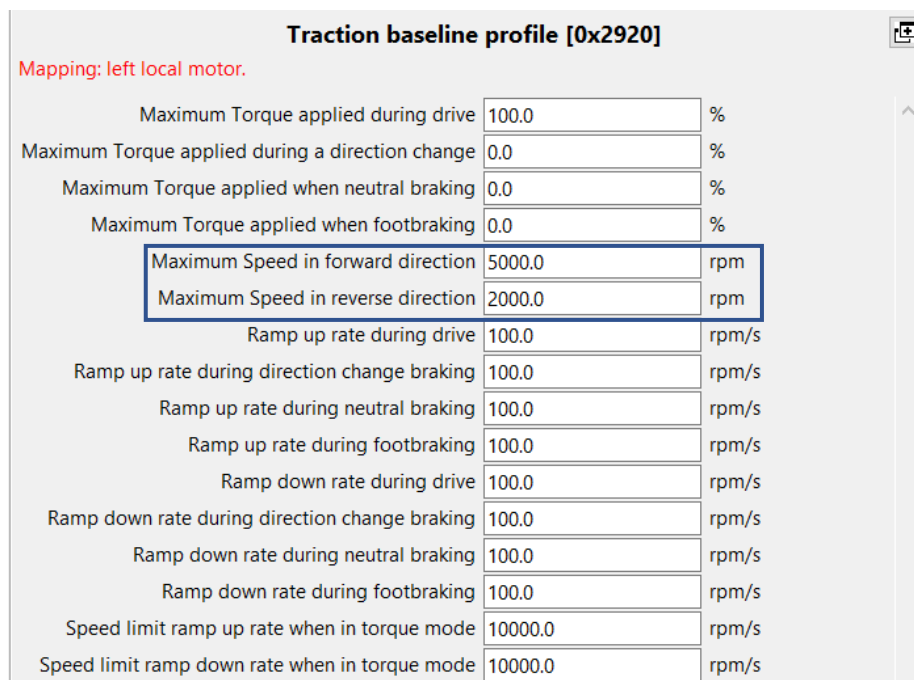


Fig. 36 Profilul de tracțiune al mașinii de inducție studiate în programul DVT



## Implementarea unui Sistem de Propulsie Electrică cu ajutorul unei Mașini de Inducție cu Colivie Rotorică din Cupru

Contactorul de linie din sistemul de propulsie este configurat în programul DVT în așa fel încât, tensiunea de pornire să fie aceeași cu tensiunea menținută pe toată perioada funcționării conform figurii 37.

Pull-In Voltage	<input type="text" value="32.0"/>	V
Pull-In Time	<input type="text" value="2.0"/>	Seconds
Hold-In Voltage	<input type="text" value="32.0"/>	V

Fig. 37 Valorile de tensiune ale contactorului de linie în programul DVT

Semnalul de intrare analogic (pedala de accelerație) și cele 4 semnale de intrare digitale sunt interpretate de controler pe pinii regăsiți în figura 38.

Local Analog Inputs		Local Digital Inputs	
# of Inputs:	<input type="text" value="1"/>	# of Inputs:	<input type="text" value="4"/>
Analog In. 1:	Throttle Input Voltage <input type="text" value="Pin.22"/>	Digital In. 1:	Forward Switch <input type="text" value="Pin.18"/>
Analog In. 2:	Not Mapped <input type="text" value="Pin.23"/>	Digital In. 2:	Reverse Switch <input type="text" value="Pin.30"/>
Analog In. 3:	Not Mapped <input type="text" value="Pin.34"/>	Digital In. 3:	FS1 switch <input type="text" value="Pin.19"/>
Analog In. 4:	Not Mapped <input type="text" value="Pin.35"/>	Digital In. 4:	Seat switch <input type="text" value="Pin.31"/>
Analog In. 5:	Not Mapped <input type="text" value="Pin.33"/>		

Fig. 38 Semnalele de intrare analogice și digitale în programul DVT

Encoderul montat pe mașina de inducție pentru detecția poziției rotorului este de asemenea configurat în programul DVT, conform datelor de catalog provenite de la producător.

Encoder Pull Up for AB	<input type="text" value="Enabled"/>	
Encoder Supply	<input type="text" value="10V"/>	
Encoder Type	<input type="text" value="AB only"/>	
Encoder delta change check	<input type="text" value="Enabled"/>	
Pulses per revolution	<input type="text" value="64.0"/>	PPR
Motor revolutions per second	<input type="text" value="1.0"/>	RPS

Fig. 39 Specificațiile encoderului în programul DVT





## Implementarea unui Sistem de Propulsie Electrică cu ajutorul unei Mașini de Inducție cu Colivie Rotorică din Cupru

Controlul curenților  $i_d$  și  $i_q$  este realizat cu ajutorul unui regulator de tip PI (proporțional integrator) pentru o funcționare corectă a mașinii de inducție și perturbații reduse.

Current control proportional gain (Kp)	0.00048828125
Current control integral gain (Ki)	0.04998779296875
Voltage Control proportional gain	0.0
Voltage Control integral gain	0.0

Fig. 40 Coeficienții regulatorului PI de curent pentru controlul mașinii de inducție studiate în programul DVT

<b>Control Mode:</b>	Speed
<b>Rescaled Gains:</b>	Scaled Kp: 0.00390625 Nm/rpm Scaled Ki: 3.125 Nm/rpm/sec
<b>Low Speed Gain Transition:</b>	Low Speed Gains < 50 rpm High Speed Gains > 200 rpm
<b>Speed Loop Filter Time Constant:</b>	100.0 milliseconds

Fig. 41 Coeficienții regulatorului PI de viteză pentru controlul mașinii de inducție studiate în programul DVT

### 3.4 Interacțiune preliminară motor-controler

Conexiunea dintre controlerul SEVCON Gen4 și programul DVT a fost realizată cu ajutorul adaptorului CAN, aceasta permițând modificarea parametrilor controlerului și implicit a motorului în timp real. Modelarea parametrilor mașinii de inducție în programul DVT a început prin încărcarea unui fișier cu extensia “.dcf”. Acest fișier are un set de parametri prestabiliți special pentru mașina de inducție, rezultând modificarea substanțială a butoanelor interfeței programului DVT.

După o primă ajustare generală a parametrilor pentru motorul de inducție studiat în această lucrare, alimentarea întregului sistem a dus la diferite erori care au putut fi vizualizate în programul DVT cu ajutorul butonului “Get Fault Information”. Aceste erori au făcut referire la depășirea unor limite, prestabilite în program, a diferitelor valori introduse în meniul de parametri a motorului de inducție, dar și în meniul bateriei. După modificarea valorilor, astfel încât acestea să se afle în intervalele prestabilite, erorile legate de parametri au dispărut.



## **Implementarea unui Sistem de Propulsie Electrică cu ajutorul unei Mașini de Inducție cu Colivie Rotorică din Cupru**

Introducerea în sistemul de propulsie a unei bobine de 32V pentru alimentarea contactorului de linie a rezultat o serie nouă de erori, iar controlerul a intrat într-o stare de protecție. Aceste erori au fost datorate conflictului dintre programul DVT și bobina contactorului care aveau aceeași opțiune de reducere a tensiunii de menținere la o anumită valoare. Eroarea a fost rezolvată prin dezactivarea completă a acestei opțiuni din programul DVT. În plus am înlocuit contactorul inițial, GIGAVAC GV 200PA cu un contactor mai simplu și mai ieftin ZJW200A DC.

Următoarea problemă întâmpinată a avut legatură tot cu aceeași bobină a contactorului. Prin alimentarea de la sursa programabilă cu o tensiune de 32Vcc și o limitare a curentului de 3A (valoarea maximă a sursei respective) comutatorul se închidea și se deschidea într-un timp foarte scurt, astfel acesta nu reușea să mențină tensiunea impusă. Eroarea era descrisă sub forma unei probleme la alimentare “Supply critical”, iar după diferite încercări eșuate de modificare a parametrilor bateriei din programul DVT, am înțeles că problema provenea de la limitarea în curent a sursei programabile. Condensatoarele controlerului aveau nevoie de un curent mai mare pentru încărcarea preliminară. Înlocuirea sursei programabile cu o sursă de putere mai mare care suportă un curent superior a dus, într-un final, la rezolvarea problemei.

Pedala de accelerație a fost instalată în programul DVT cu ajutorul unui buton din meniul principal “Configuration Helper” numit “Throttle/Footbrake Setup”. După acționarea acestui buton, a apărut o fereastră cu mesajul “Apply full throttle”, adică a trebuit executat un ciclu complet al pedalei pentru ca programul DVT să configureze limitele în tensiune ale pedalei. Acestea au fost setate în meniul “Analog Ranges”, astfel pedala are un interval de tensiune cuprins între 0.5 și 12V în funcție apăsarea acesteia. Este important ca limita inferioară să fie mai mare de 0V, deoarece potențiometrul poate genera zgomot care este perceput de motor ca și impuls de comandă.



## **CAPITOLUL 4 – REZULTATE EXPERIMENTALE**

### **4.1 Testarea encoderului**

Encoderul a fost testat separat cu ajutorul unei surse programabile și un osciloscop pentru a confirma funcționalitatea acestuia. Sursa programabilă a fost setată pe conexiunea de curent continuu, cu o valoare de 10Vcc. Cablul roșu al encoderului a fost conectat la borna cu potențial pozitiv a sursei, iar cablul negru la borna negativă. Cablul alb și cablul verde, echivalente semnalelor encoderului A și B, au fost vizualizate cu ajutorul unui osciloscop, iar prin învârtirea ușoară a axului motorului de inducție, s-au format semnale rectangulare pe ecranul osciloscopului.

### **4.2 Testarea în regim de motor a propulsiei unui Vehicul Electric folosind motorul în studiu**

Implementarea sistemului de propulsie electrică în format fizic a fost realizată cu următoarele echipamente – a se vedea figura 42:

- Mașina de inducție cu colivie rotorică din cupru ( + traductor de poziție de tip Encoder);
- Controlerul SEVCON Gen4 Size4;
- Cutie cu borne și comutatoare;
- Sursă programabilă 32V;
- Programul DVT instalat și utilizat pe un laptop;
- Adaptor CAN *IXXAT* cu conversie USB;
- Contactorul de linie (bobină în curent continuu 32V);
- Pedala de accelerație (potențiometru 0 – 5k $\Omega$  ).

După alimentarea întregului sistem de propulsie cu o tensiune de 32V, comutarea contactorului principal “cheie” și respectarea succesiunii conectării pinilor celor 4 comutatoare (descrișă la subcapitolul 3.1), motorul de inducție trifazat se accelerează cu ajutorul pedalei în direcția înainte la o turație nominală de 2500 rpm (fig 43), din turație maximă de 5000 rpm, iar la mersul înapoi (fig.44) până la turația de -2000 rpm (limitările turației s-au realizat în programul DVT).



## Implementarea unui Sistem de Propulsie Electrică cu ajutorul unei Mașini de Inducție cu Colivie Rotorică din Cupru

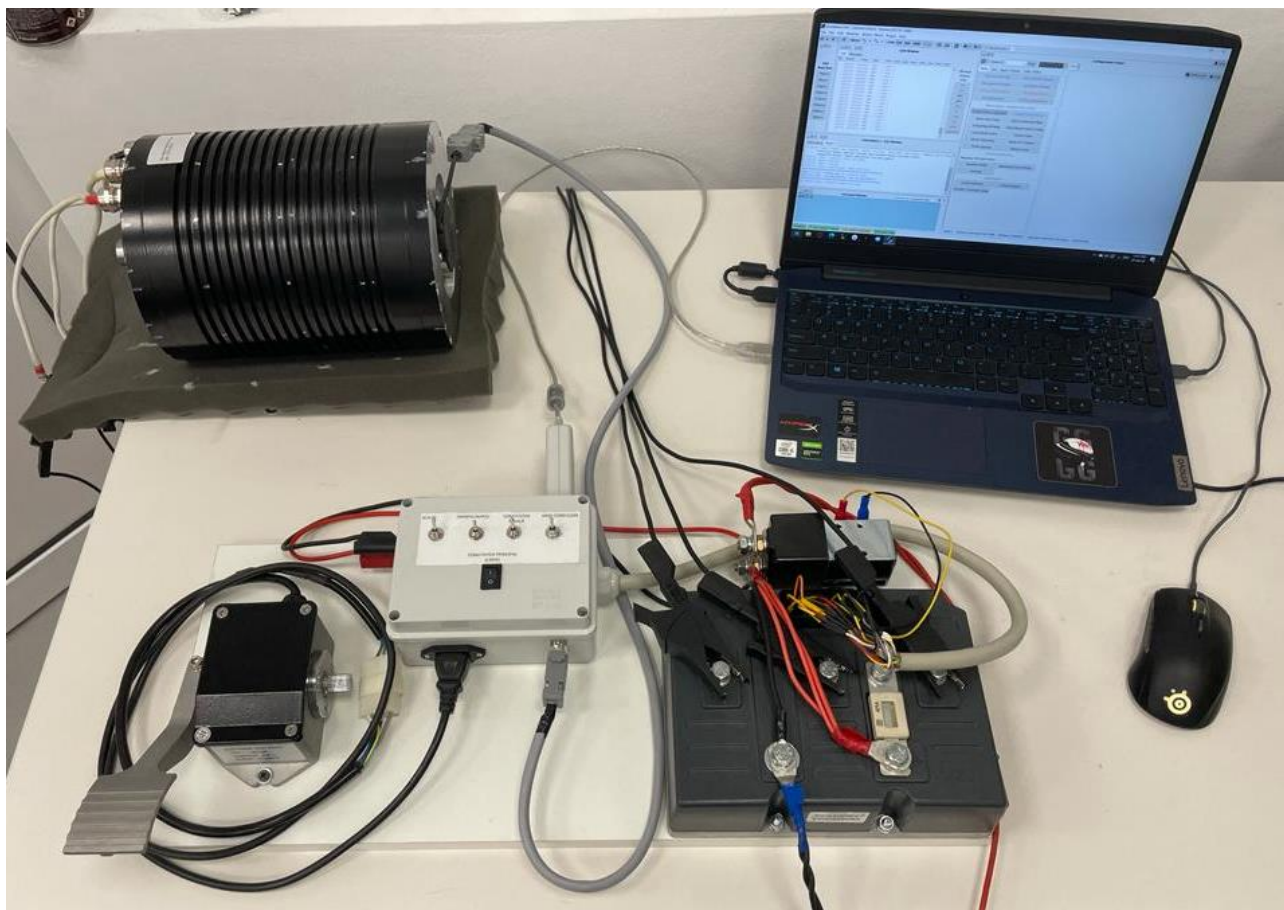


Fig. 42 Implementarea sistemului de propulsie în format fizic

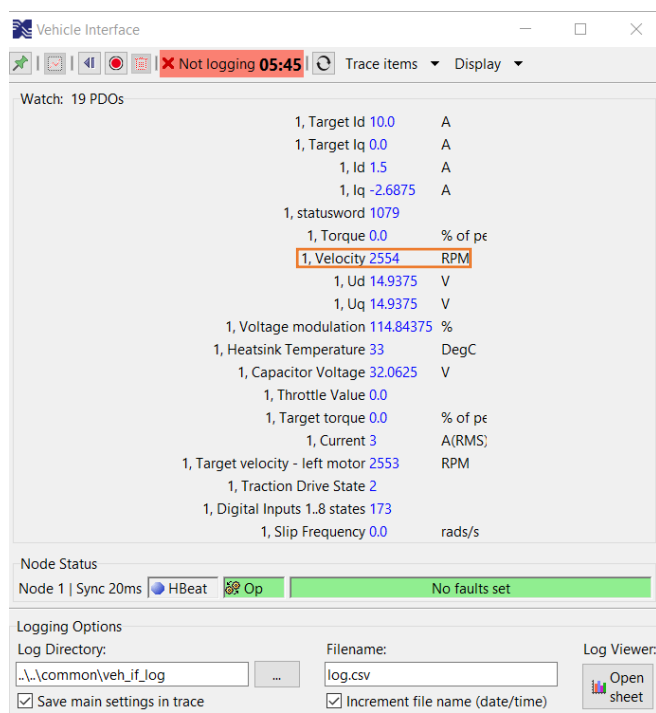


Fig. 43 Funcționarea motorului de inducție la turația de 2500 rpm



## Implementarea unui Sistem de Propulsie Electrică cu ajutorul unei Mașini de Inducție cu Colivie Rotorică din Cupru

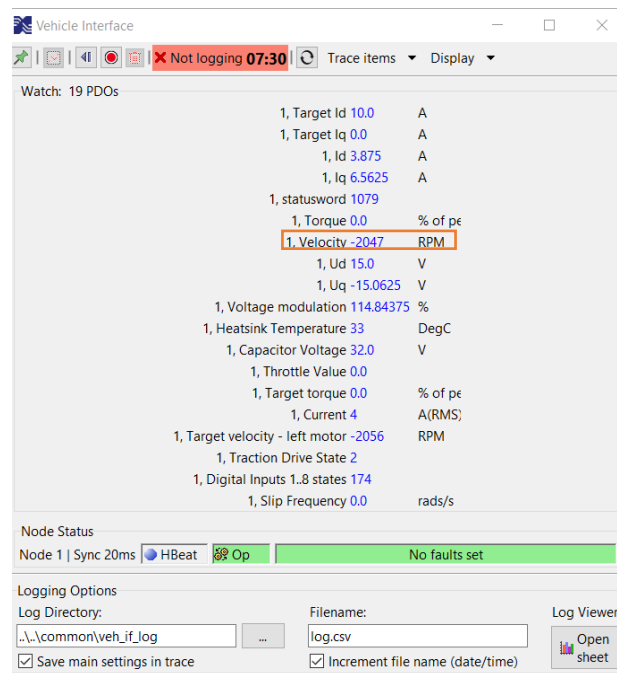


Fig. 44 Funcționarea motorului de inducție la turația de -2000 rpm

De asemenea, mașina de inducție a fost accelerată la turația de aproximativ 4000 rpm pentru a vizualiza comportamentul acesteia în regimul de accelerare și decelerare într-o anumită perioadă de timp. Pe porțiunea de accelerare, conform figurii 45, mașina de inducție a ajuns la turația de 4000 rpm în aproximativ 38 de secunde, iar pe cealaltă porțiune, mașina a decelerat în aproximativ 90 de secunde pentru a ajunge la viteza 0 rpm.

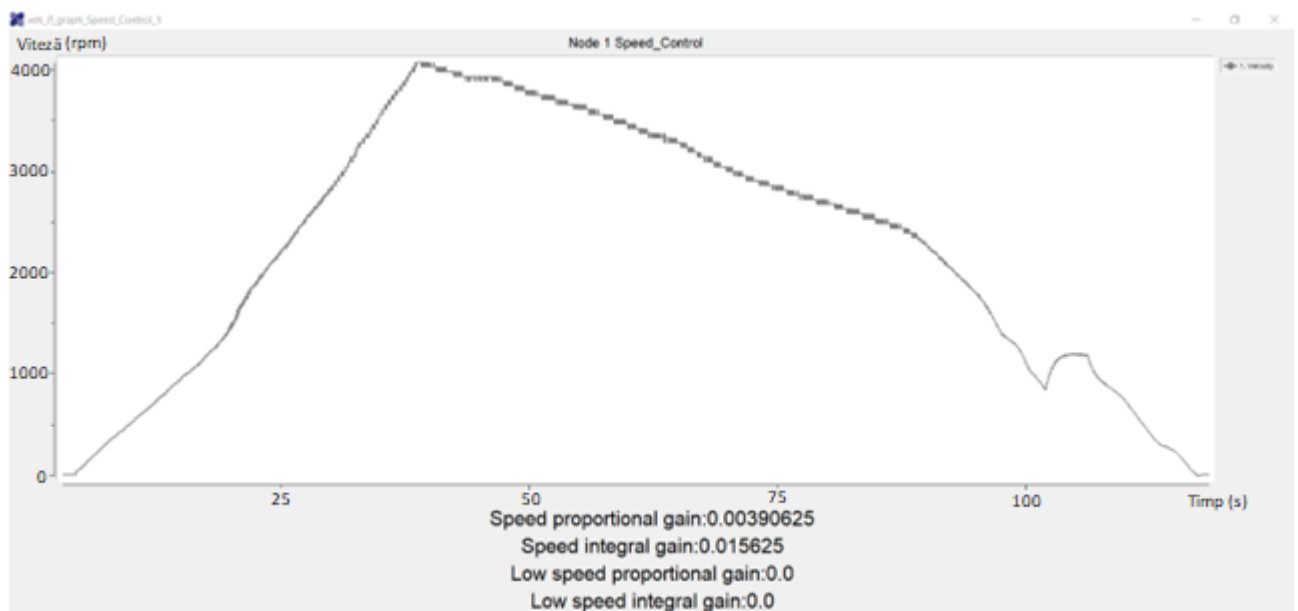


Fig. 45 Graficul vitezei în raport cu timpul a mașinii de inducție studiate



## Implementarea unui Sistem de Propulsie Electrică cu ajutorul unei Mașini de Inducție cu Colivie Rotorică din Cupru

Comportamentul mașinii de inducție în regimurile de accelerare și decelerare este în strânsă legătură cu curenții  $i_d$  (graficul de culoare portocaliu din fig. 46) și  $i_q$  (graficul de culoare mov din fig. 46). Evoluția acestor curenți este condiționată de gradul de apăsare a pedalei de accelerație, dar și a inerției mașinii, fenomen care impune o scădere a vitezei constantă.

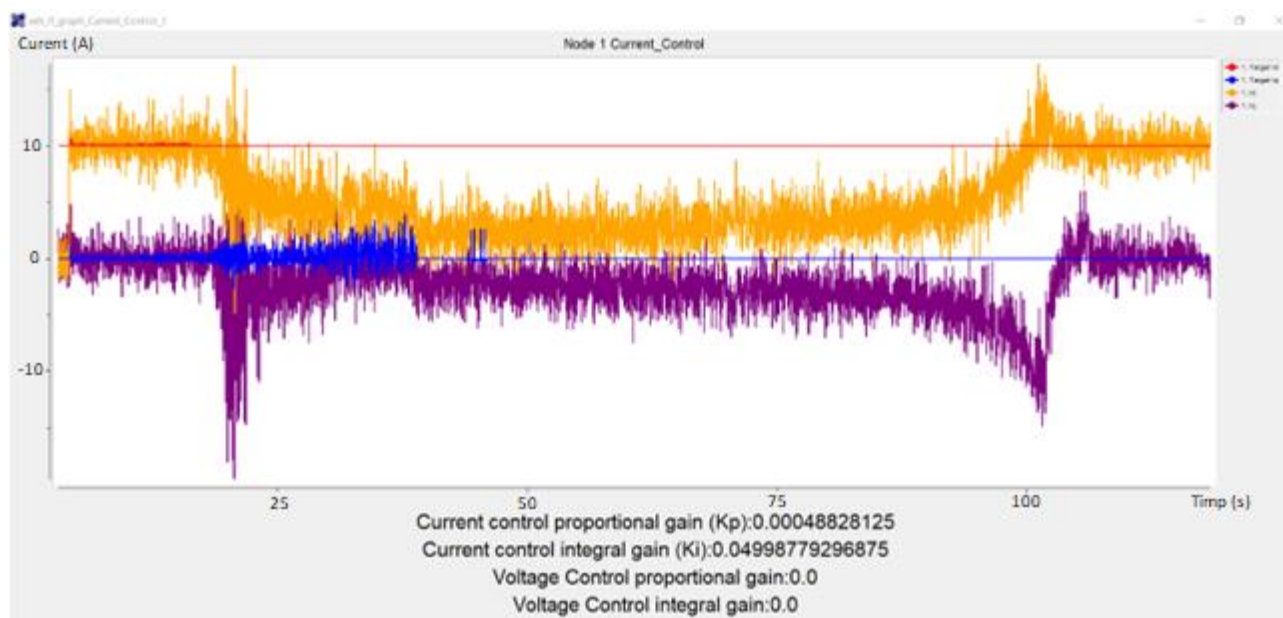


Fig. 46 Graficul controlului de curent a mașinii de inducție studiate

### **Legenda fig.46:**

- Semnalul Roșu: curentul de referință  $i_d$ ;
- Semnalul Albastru: curentul de referință  $i_q$ ;
- Semnalul Galben: curentul  $i_d$ ;
- Semnalul Mov: curentul  $i_q$ .

În imaginea de mai sus se poate observa curentul de referință în cele două axe ortogonale (d, q) ale mașinii de inducție controlate. Funcționarea mașinii de inducție pornește de la curentul 0, moment în care pedala de accelerație nu este acționată. În foarte scurt timp de la pornire, pedala de accelerație a fost apăsată la maxim, iar curentul  $i_d$  a ajuns la valoarea maximă de 10A aproape instantaneu. Deoarece nu există cuplu de sarcină, curentul de referință în axa q este 0, la fel și cel măsurat (efectul de comutație fiind evident). Curent  $i_q$  ajunge negativ în momentul în care motorul de inducție intra în regim de slăbire de flux. Dincolo de turația de 2500 rot/min controlul intră în bucla de slăbire de flux. Același efect se poate observa și asupra curentului  $i_d$ , care în regim de slabire de flux este diminuat.

Oscilația curenților este datorată modului de funcționare al mașinii de inducție studiate în regimul de mers în gol. După aproximativ 20 de secunde, pedala de accelerație a fost readusă la



## **Implementarea unui Sistem de Propulsie Electrică cu ajutorul unei Mașini de Inducție cu Colivie Rotorică din Cupru**

starea de repaus, moment în care, mașina de inducție trece printr-un regim tranzitoriu și tinde să reducă viteza în punctul inițial de 0 rpm. Această decelerare puternică impune un șoc asupra celor doi curenți  $i_d$  și  $i_q$  printr-un cuplu negativ.

În scurt timp, în aproximativ secunda 30 de funcționare a motorului de inducție, o scurtă acționare a pedalei de accelerație induce o perturbație asupra celor doi curenți  $i_d$  și  $i_q$ .

Scăderea constantă a turației motorului de inducție este, de asemenea, perturbată în secunda 100 de funcționarea prin aplicarea unei mici sarcini oarecare asupra axului motorului.

La finalul testul de funcționare, mașina de inducție ajunge la viteza inițială de 0 rpm în aproximativ 125 de secunde.





## **CAPITOLUL 5 – CONCLUZII**

Proiectul de diplomă a avut ca scop implementarea unui sistem de propulsie electrică cu ajutorul unei mașini de inducție cu colivie rotorică din cupru care ar putea fi utilizat într-un vehicul electric.

Lucrarea a început prin explicarea importanței implementării sistemului de propulsie electrică pe vehicule cu scopul de a reduce emisiile de CO<sub>2</sub>, în special din mediul urban, pentru a îmbunătăți calitatea vieții.

În primul capitol au fost prezentate noțiunile generale și teoretice ale mașinii de inducție pe baza definiției generale, modurilor de funcționare, caracteristicilor principale și controlul vectorial al acesteia.

Capitolul 2 a cuprins specificațiile principale și geometrice ale mașinii de inducție și a encoderului utilizat, iar mai apoi controlerul Sevcon Gen4 cu interfața specială a acestuia (programul DVT) care au avut ca scop parametrizarea cu ușurință a mașinii de inducție.

În capitolul 3 este descrisă funcționalitatea întregului sistem de propulsie electrică studiat pe baza diagramei bloc. Partea a doua a capitolului 3 a fost destinată parametrizării mașinii de inducție utilizate în această lucrare cu ajutorul programului DVT.

Capitolul 4 a cuprins implementarea sistemului de propulsie electrică în format fizic, iar mai apoi, rezultatele experimentale obținute în urma testării acestui sistem.

În concluzie, îmbunătățirea calității vieții și siguranța sănătății cetățenilor este amenințată de cantitatea mare a emisiilor de carbon produse de propulsia vehiculelor convenționale. Astfel, implementarea unui sistem de propulsie electrică va schimba în totalitate condițiile de trai și va asigura oamenilor un mijloc de transport considerat “verde”, foarte performant, fiabil și cu costuri reduse în exploatare.





## **BIBLIOGRAFIE**

- [1] [https://en.wikipedia.org/wiki/Electric\\_vehicle#Experimentation](https://en.wikipedia.org/wiki/Electric_vehicle#Experimentation)
- [2] <https://power-mi.com/content/vibration-analysis-electric-induction-motors>
- [3] [https://en.wikipedia.org/wiki/Induction\\_motor](https://en.wikipedia.org/wiki/Induction_motor)
- [4] [https://www.brainkart.com/article/Design-of-Induction-Motors\\_12303/](https://www.brainkart.com/article/Design-of-Induction-Motors_12303/)
- [5] Alessandro Marfoli, Mauro Di Nardo, Michele Degano, Chris Gerada, Werner Jara. (2021). IEEE Open Journal of Industry Applications, 110 – 120, Volumul 2
- [6] [https://www.researchgate.net/figure/Three-phase-inverter-circuit\\_fig5\\_259373981](https://www.researchgate.net/figure/Three-phase-inverter-circuit_fig5_259373981)
- [7] <https://www.elprocus.com/what-is-a-three-phase-inverter-working-its-applications/>
- [8] [https://www.dynapar.com/technology/encoder\\_basics/motor\\_encoders/](https://www.dynapar.com/technology/encoder_basics/motor_encoders/)
- [9] [https://en.wikipedia.org/wiki/Rotary\\_encoder](https://en.wikipedia.org/wiki/Rotary_encoder)
- [10] <https://blog.orientalmotor.com/incremental-vs-absolute-systems>
- [11] [https://en.wikipedia.org/wiki/Vector\\_control\\_\(motor\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Vector_control_(motor))
- [12] Daniel Fodorean, Florin Nicolae Jurca, Mircea Ruba, Dan-Cristian Popa (2013). Monitorization Variants for Light Electric Vehicle: design, magnetic, mechanical and thermal aspects. Cluj-Napoca, Editura: Alma Mater.
- [13] Popescu M. (2000). Induction Motor Modelling for Vector Control Purposes, Helsinki University of Technology, Laboratory of Electromechanics, Report, Espoo, 144 p.
- [14] Gabriel-Octavian CIMUCA. (2005). Teză de doctorat: SYSTEME INERTIEL DE STOCKAGE D'ENERGIE ASSOCIE A DES GENERATEURS EOLIENS, 39 – 40.

\*\*\* Agenția Europeană de mediu

