



Universitatea POLITEHNICA din București



Școala Doctorală de Inginerie Electrică

Teză de Doctorat - Rezumat

Strategii de optimizare a consumului de energie pentru vehicule electrice

traducere din limba engleză

Îndrumător:

Prof. Dr. Ing. Aurelian CRĂCIUNESCU

Autor:

Ing. Cristian-Liviu POPESCU

BUCUREȘTI

2023

CONTENTS

I.	Introducere în Subiectul de Cercetare	4
I.1.	Principalele probleme urmărite	4
I.2.	Obiectivul cercetării	5
II.	Vehicule Electrice: Modelare și Simulare. Calculul Cerinței pentru Grupul Motopropulsor	5
II.1.	Realizarea modelelor pentru motopropulsoare multimotoare	5
II.2.	Simulare.....	5
II.3.	Rezultatele Obținute Implicând mai multe motoare într-un grup motopropulsor	6
II.3.1.	Metodă de trecere de la datele unui ciclu de testare la cerința de cuplu	6
II.3.2.	Acoperirea zonei operaționale de către grupul motopropulsor	7
II.4.	Concluzii.....	9
III.	Optimizări Bazate pe Alocarea de Sarcină între Motoare și Limitele Grupului Motopropulsor	9
III.1.	Metode de alocare statică a sarcinii	9
III.1.1.	Definiții de distribuții de sarcină: complementară, procentuală, proporțională și optimă	10
III.1.2.	Distribuție complementară de sarcină	10
III.1.3.	Distribuții de sarcină utilizând un procent fix: procentuală, proporțională și optimă	12
III.2.	Metoda de alocare dinamică a sarcinii	14
III.2.1.	Definiție.....	14
III.2.2.	Exemplu de distribuție de sarcină bazată pe minimizarea pierderilor interne ale motoarelor	14
III.3.	Metoda de alocare mixtă a sarcinii	15
III.3.1.	Definiție.....	15
III.3.2.	Extinderea capacităților vehiculului folosind distribuția mixtă a sarcinii.....	15
III.4.	Limite fizice ale grupului motopropulsor	17
III.5.	Concluzii.....	18
IV.	Tehnici de Optimizare pentru Sisteme de Propulsie cu Motoare BLDC.....	18
IV.1.	Realizarea modelului motorului	18
IV.2.	Curenți ideali și reali ai motorului.....	19
IV.3.	Aplicarea metodelor Phase Advance și Dwell Control	19
IV.4.	Concluzii.....	22
V.	Influența Metodelor PA și DC asupra Sistemelor de Propulsie cu Motoare BLDC.....	23
V.1.	Acoperirea zonei operaționale cu PA	23
V.2.	Acoperirea zonei operaționale completând PA cu DC.....	25

V.3.	Impact asupra cuplului generat de sistemul de propulsie	26
V.4.	Pa și DC pentru îmbunătățirea eficienței energetice într-un sistem de propulsie cu motoare BLDC	28
V.4.1.	Date de intrare pentru investigație	28
V.4.2.	Îmbunătățirea eficienței energetice în fiecare punct de operare	29
V.4.3.	Rezultate	30
V.5.	Concluzii.....	31
VI.	Analiza de Metode de Realizare a Hărților de Eficiență pentru Motoare cu Magneți Permanenți. Impactul Motoarelor Adiționale, Similare, asupra Grupului Motopropulsor al VE. Complemente pentru Capitolul III	32
VI.1.	Rezultatele calculului analitic.....	32
VI.2.	Realizarea hărților de eficiență prin simulare și tratarea datelor	33
VI.3.	Exemplu de constituire a grupului motopropulsor folosind datele obținute anterior	34
VI.4.	Concluzii.....	35
VII.	Pregătirea Dezvoltărilor Experimentale	35
VII.1.1.	Investigații cu motoare sincrone cu magneți permanenți (PMSM).....	35
VII.2.	Pregătirea pentru platformele fizice	35
VII.2.1.	Surse de tensiune electrică	35
VII.3.	Producerea de cuplu rezistent	36
VII.4.	Concluzii.....	37
VIII.	Dezvoltarea Platformelor Fizice și Măsurători	38
VIII.1.	Dezvoltarea platformelor fizice	38
VIII.1.1.	Platformă cu un motor independent	38
VIII.1.2.	Platformă cu două motoare rulând la aceeași viteză	38
VIII.1.3.	Platformă cu două motoare independente	38
VIII.1.4.	Controlul platformelor implementat cu microcontroler STM32.....	39
VIII.2.	Determinări fizice	40
VIII.2.1.	Măsurări experimentale.....	40
VIII.2.2.	Constituirea convertorului electro-mecanic de curent continuu (DCEMC).....	40
VIII.2.3.	Determinarea zonei de operare a motoarelor	40
VIII.3.	Concluzii	42
IX.	Concluzii Generale și Oportunități Viitoare de Cercetare	42
	Contribuții originale	45
	Publicații ale Autorului	46

I. INTRODUCERE ÎN SUBIECTUL DE CERCETARE

I.1. Principalele probleme urmărite

În pregătirea obiectivului cercetării au fost efectuate studii preliminare. Principale mărimi ale vehiculelor electrice (VE) legate de electrificare și caracteristici ale tipurilor esențiale de motoare care ar putea fi utilizate pentru tracțiune electrică sunt prezentate în următoarele două tabele.

Tabelul I-1. Creșterea principalelor caracteristici legate de electrificare

Mobilitate Electrică	Masă totală	Viteză	Autonomie	Grup motopropulsor electric	Baterie
Micromobilitate*	<1/4 t	25 km/h	30 km	250 W	280Wh
VE cu două / trei roți					
VE de viteză redusă		40-70 km/h			
VE comerciale ușoare					
Autoturisme		200-250 km/h	500 km	100-500 kW	100 kWh
Autobuze			500 km		660 kWh
Camioane					

Tabelul I-2. Principalele caracteristici ale tipurilor esențiale de motoare analizate în pregătirea cercetării propriu-zise

Caracteristici	Tip motor			
	Motorul de Curent Continuu	Motorul de Inducție	Motoare cu Magneți Permanenți	Motoare cu Reluctanță Variabilă
Densitatea de putere	Scăzută	Medie	Foarte mare	Medie
Eficiență energetică	Scăzută	Medie	Foarte mare	Medie
Controlabilitate	Foarte mare	Foarte mare	Mare	Medie
Fiabilitate	Medie	Foarte mare	Mare	Foarte mare
Maturitate Tehnologică	Foarte mare	Foarte mare	Mare	Mare
Cost	Mic	Foarte mic	Mare	Mic

Un alt avantaj al motoarelor electrice este subliniat și de posibilitatea de a integra mai multe motoare într-un grup motopropulsor pentru un vehicul.

I.2. Obiectivul cercetării

Obiectivul principal este de a dezvolta strategii de optimizare a consumului de energie pentru VE folosind motoare electrice cu mare densitate de putere și mai precis motoare cu magneți permanenți completate prin utilizarea de grupurilor motoare multimotoare. O atenție specială este dedicată modelării și simulării vehiculelor electrice, cu accent special pe grupul motopropulsor și, în mod specific, modului în care o cerința de vehicul este transformată în puncte de operare pentru grupul motopropulsor și determinarea caracteristicile grupului motopropulsor. Următorul obiectiv secundar se referă la cercetarea grupului motopropulsor cu mai multe motoare pentru a determina principalele strategii pentru metodele de alocare a cuplului motor, criteriile de optimizare a eficienței energetice și studiul limitelor grupului motopropulsor în funcție de caracteristicile vehiculului. În ceea ce privește motoarele electrice, există cercetări pentru îmbunătățirea controlului motoarelor BLDC (motoare fără perii alimentate în curent continuu) cu metode avansate de îmbunătățire a capacităților motorului (viteză, cuplu, randament) și eficiența energetică a vehiculului. Un alt aspect propus a fi explorat se referă la sistemele motopropulsoare performante multimotoare prin alegerea motoarelor și a metodologiilor de investigare și construire a hărților de eficiență. Pentru verificarea experimentală există un interes în dezvoltarea platformelor multimotoare care integrează controlere de motoare specifice și un sistem de supraveghere dedicat.

II. VEHICULE ELECTRICE: MODELARE ȘI SIMULARE. CALCULUL CERINȚEI PENTRU GRUPUL MOTOPROPULSOR

II.1. Realizarea modelelor pentru motopropulsoare multimotoare

Metodă de calcul al cuplului și puterii în motopropulsoare multimotoare

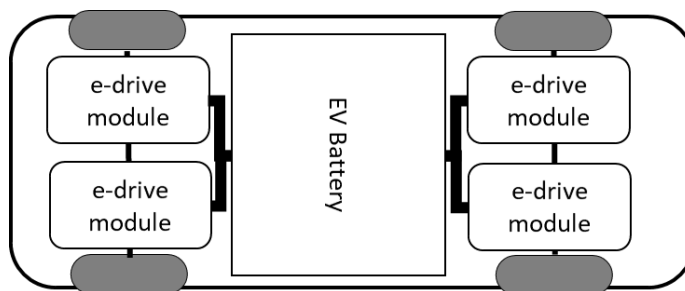


Fig. II-1. Vehicul în configurație multimotor: soluție cu patru motoare

Este posibil să se calculeze cuplul și puterea pentru fiecare motor, acoperind toate situațiile, de la grupul monomotor până la cel multimotor (m motoare). Metoda este prezentată în versiunea lungă a tezei. Spre exemplu, o soluție cu două motoare PM este implementată sub simulare. Fiecare axă este acoperită de un motor, iar cuplul total este distribuit între axa față și spate.

II.2. Simulare

O vedere generală poate fi reprezentată așa cum se arată în Fig. II-2., prin trei module principale care acoperă: cerințele, controlul sistemelor și generarea de energie mecanică.

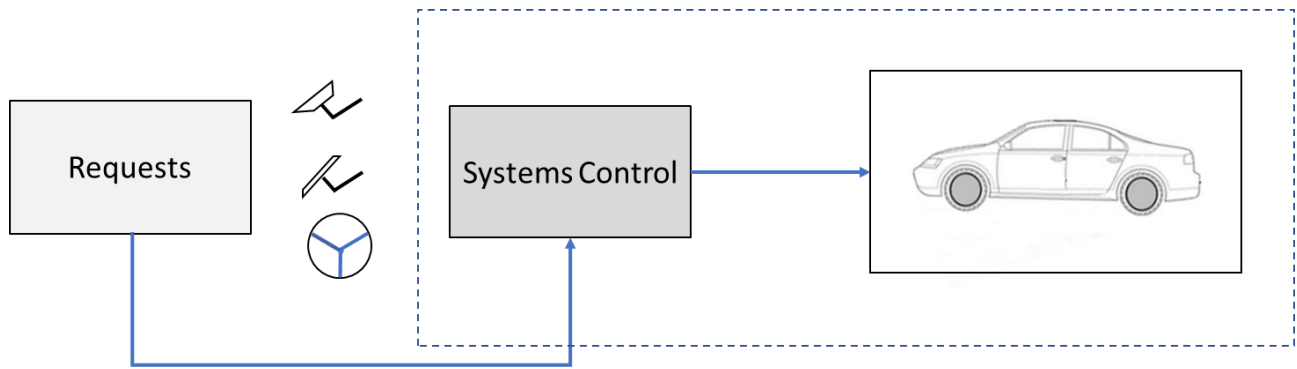


Fig. II-2. Simularea vehiculului – vedere generală asupra modulelor

Credințele sunt generate de un profil de vitezei care trebuie urmat (ciclu de testare). Informația este transformată de un model de șofer în solicitări de accelerație, decelerare/frânare. Modulul de control al sistemelor integrează modele dedicate managementului energiei la bord și controlului grupului motopropulsor. Generarea puterii mecanice și a modelelor de transmisie se află în spatele blocului cu vehiculul.

II.3. Rezultatele Obținute Implicând mai multe motoare într-un grup motopropulsor

II.3.1. Metodă de trecere de la datele unui ciclu de testare la cerința de cuplu

Tabelul II-1. Caracteristicile vehiculului pentru studiul cerinței de cuplu

Caracteristică	Valoare	Unitate de Măsură
Masă maximă	250	Kg
Raza roții	0.275	M
Coeficientul de rezistență aerodinamică	0.46	-
Suprafața frontală	0.92	m ²
Raport de transmisie de la motor la roată	1	-

Tabelul II-2. Coeficienți de forțe rezistente pentru studiul cerinței de cuplu

Coeficient	Valoare
Aderență	0.8
Rezistență la rulare	0.013

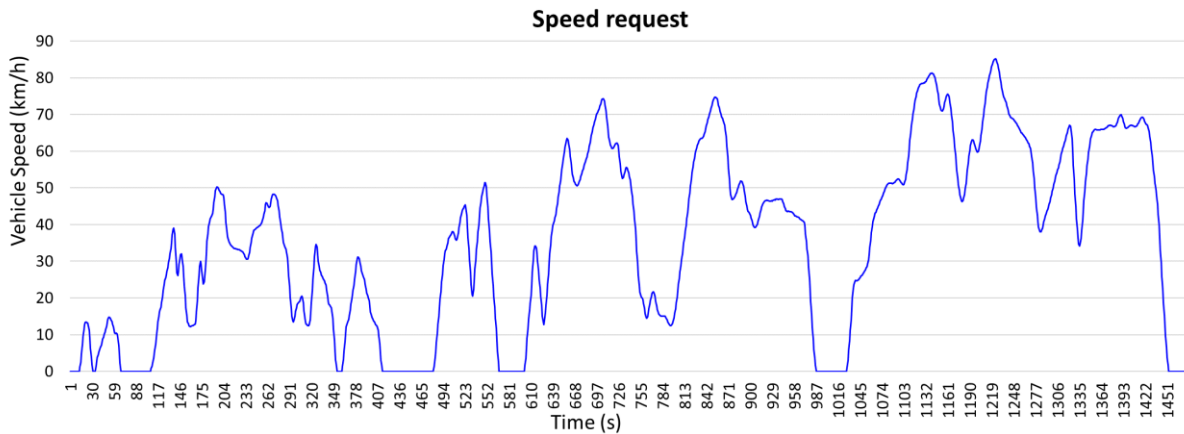


Fig. II-3. WLTC – class 2 – ciclu de viteză

Din profilul de viteza rezulta cererea de acceleratie.

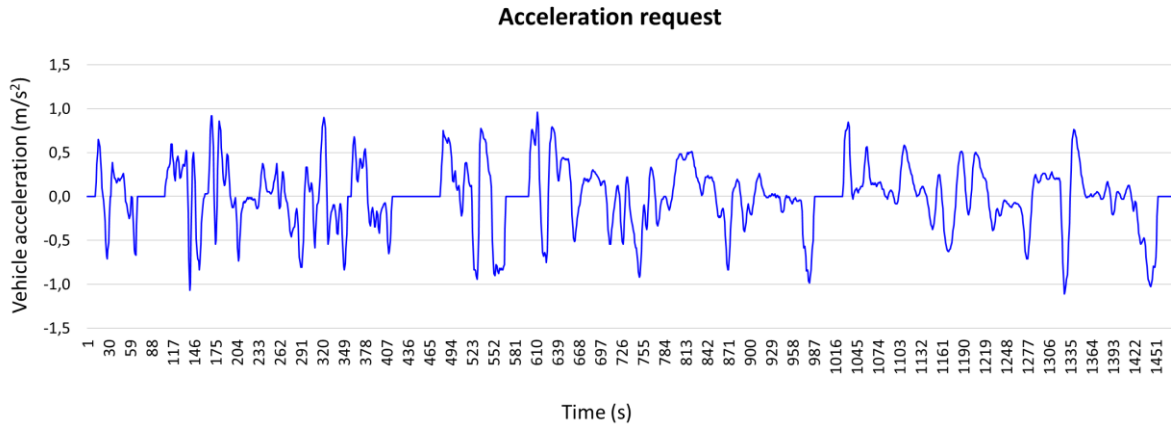


Fig. II-4. WLTC – class 2 – evoluția accelerației pentru studiul cerinței de cuplu

Pentru deplasarea vehiculului cu o accelerație a , forța de tracțiune este

$$F_t = F_{ra} + G_t + F_f + Ma, \quad (\text{II-1})$$

unde F_{ra} este forța de rezistență aerodinamică, G_t forța de rezistență la urcare, F_f forța de frecare la rulare, M masa vehiculului, și a accelerația acestuia.

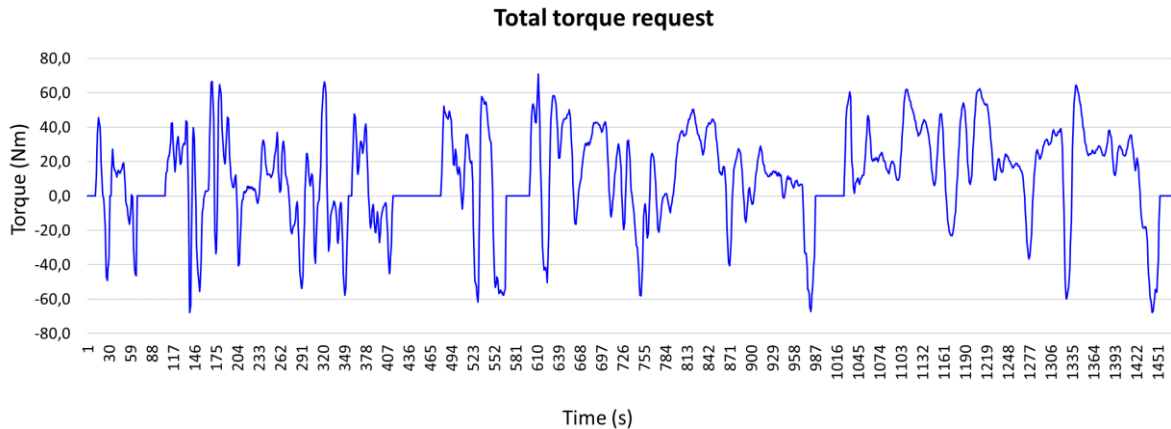


Fig. II-5. Evoluția cuplului total solicitat la nivelul roților

În situația în care vehiculul rulează pe o suprafață plană, $G_t = 0$. Pentru fiecare roată, forța normală asupra roții înmulțită cu coeficientul de aderență dă forța maximă pe care o poate oferi roata respectivă păstrând aderența. În cazul nostru toate roțile contribuie la generarea efortului de tracțiune, astfel încât cererea totală de cuplu reprezintă suma cuplurilor generate de fiecare motor, neglijând pierderile mecanice în transmisii. Cuplul rezultat este produsul dintre raza roții și forța de tracțiune, Fig. II-5.

II.3.2. Acoperirea zonei operaționale de către grupul motopropulsor

Construirea punctelor de operare pentru grupul motopropulsor

Cerința de viteză (Fig. II-3.) și cuplul total (Fig. II-5.) sunt funcții de timp. Înlocuind timpul dintre cele două funcții este posibilă reprezentarea cerinței de cuplu în funcție de viteză. Folosind date discrete, dependența dintre cerința de cuplu și cerința de viteză este un nor de puncte, așa cum se arată în figura următoare. Pe mai departe, norul de puncte ia denumirea de **puncte de operare**.

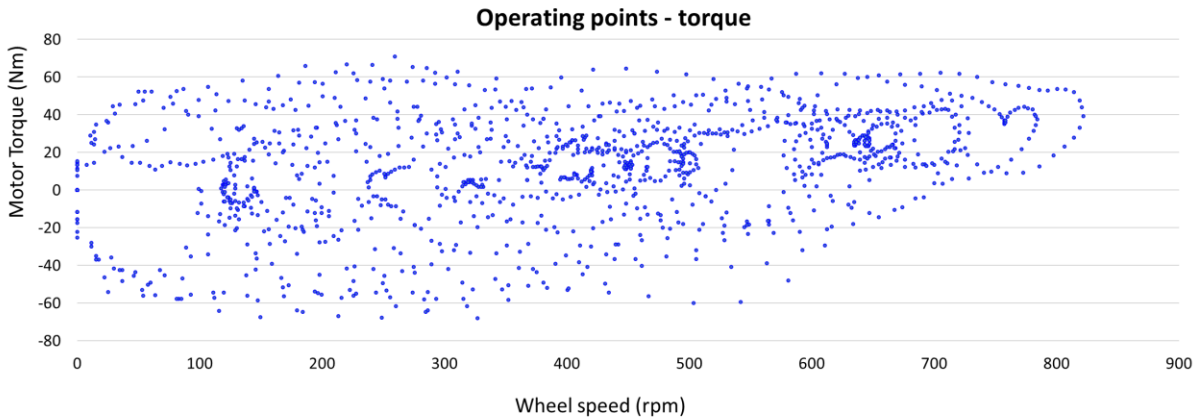


Fig. II-6. Cerința de puncte de operare pentru cuplu

Caracteristicile motoarelor utilizate în analiză

Două motoare BLDC sunt integrate pentru tratarea cerinței de cuplu.

Tabelul II-3. Caracteristicile motoarelor pentru studiul cerinței de cuplu

Caracteristici	Motor One	Motor Two
Putere Nominală/Max	4 / 8 kW	3 / 6 kW
Constantă de cuplu	1.655 Nm/A	1.800 Nm/A
Rezistență internă	0.128 Ω	0.130 Ω
Cuplu maxim	182 Nm	180 Nm
Turație maximă	880 rpm	880 rpm

Procesul care utilizează calculul analitic prin programare pentru a obține caracteristicile motorului este prezentat în Fig. II-7. Curba de putere maximă este obținută pentru o tensiune de alimentare de 72V.

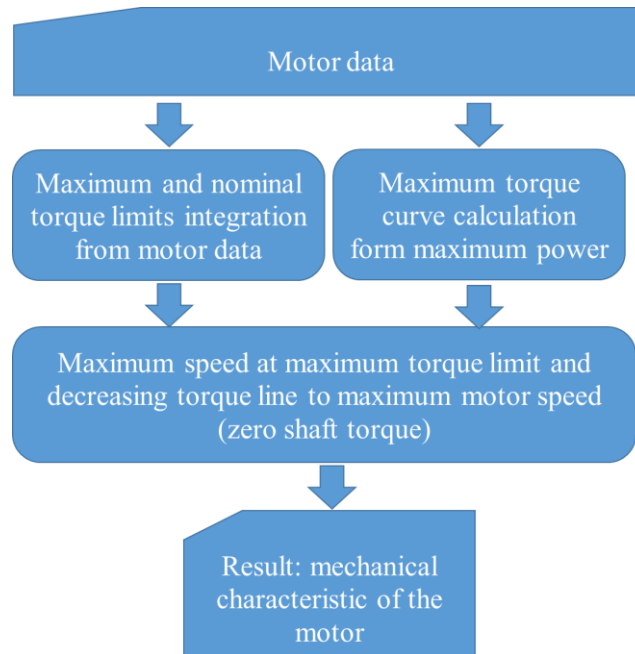


Fig. II-7. Proces de determinare a caracteristicilor mecanice pentru studiul zonei operaționale

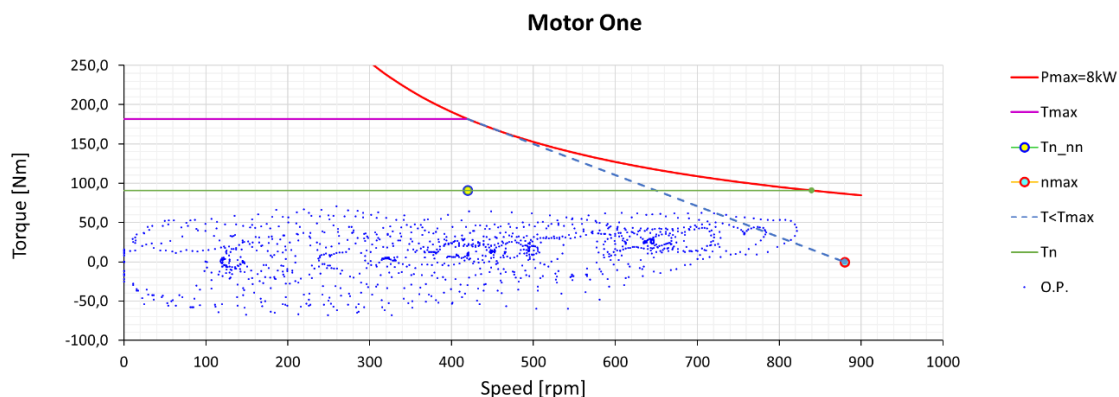


Fig. II-8. Puncte de operare și caracteristica mecanică pentru Motor One

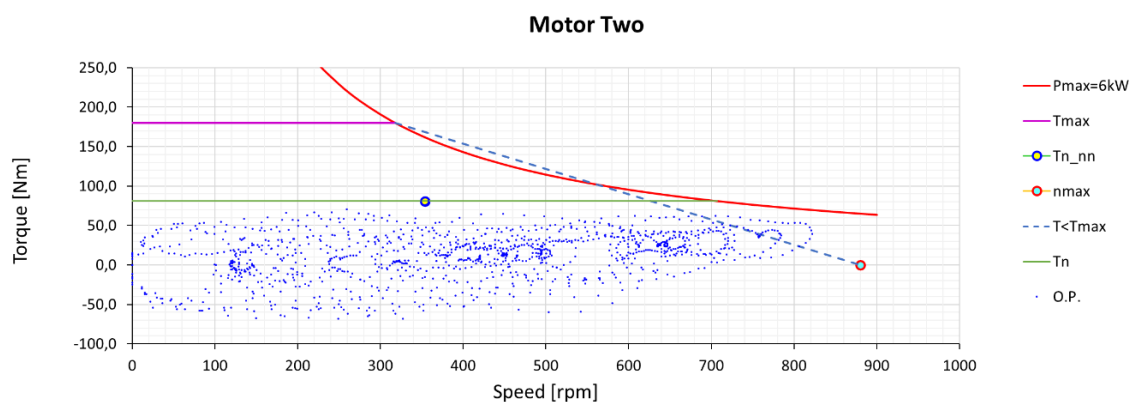


Fig. II-9. Puncte de operare și caracteristica mecanică pentru Motor Two

II.4. Concluzii

Pentru cele două motoare investigate, fiecare motor poate acoperi solicitarea vehiculului, sub valori nominale pentru aproape toată zona de operare. Cercetări specifice sunt efectuate pentru comportamentul la viteză mare, atunci când puterea nominală este depășită, referitor la capacitățile fiecărui motor de a acoperi cerințele pentru grupul motopropulsor, pe plan drept sau înclinat. Această investigație este realizată în partea a doua a capitolului III.

III. OPTIMIZĂRI BAZATE PE ALOCAREA DE SARCINĂ ÎNTRE MOTOARE ȘI LIMITELE GRUPULUI MOTOPROPULSOR

Prezentul capitol analizează soluții multimotoare în căutarea de eficiență energetică folosind metode de distribuție a sarcinii între motoare.

III.1. Metode de alocare statică a sarcinii

Păstrând stabilitatea vehiculului, un scenariu de alocare statică a sarcinii poate fi definit ca un algoritm fix de repartizare a sarcinii între motoarele grupului motopropulsor aplicate în fiecare punct de operare. Algoritmii de repartizare nu se schimbă la trecerea de la un punct de operare la altul. În acest caz, nu este nevoie de calcule suplimentare pentru fiecare punct de funcționare al grupului motopropulsor.

III.1.1. Definiții de distribuții de sarcină: complementară, procentuală, proporțională și optimă

O posibilitate este de a implica motoarele unul câte unul până la un anumit nivel de cuplu. Când cuplul solicitat depășește acest nivel, motorul în uz rămâne la cuplul atins, iar cererea de cuplu complementară este acoperită de un alt motor. Această metodă de alocare poate fi numită **distribuție complementară a sarcinii**. Atunci când motoarele grupului motopropulsor sunt implicate simultan, tot timpul, prin alocarea unui procent fix din cererea de cuplu fiecărui motor, această alocare a cuplului poate fi numită **distribuție procentuală a sarcinii**. Puterea maximă a grupului motopropulsor multimotor este suma puterii maxime a fiecărui motor. Când procentul de alocare a cuplului pentru un motor este calculat ca raport între puterea maximă a motorului și puterea maximă a grupului motopropulsor, alocarea cuplului poate fi numită **distribuție proporțională a sarcinii**. Cazul în care procentul alocării cuplului pentru fiecare motor este determinat ca urmare a optimizării eficienței grupului motopropulsor, iar alocarea respectivă a cuplului între motoare produce oricând cea mai mare eficiență decât orice altă alocare procentuală a cuplului, metoda de alocare poate fi numită **distribuție optimă a sarcinii**.

III.1.2. Distribuție complementară de sarcină

Se consideră simularea de vehicul prezentată în secțiunea II.2 pentru a exemplifica rezultatele distribuției complementare a sarcinii. Modelul de vehicul utilizat este unul clasic (limuzină) care oferă tracțiune pe două și patru roți, cu două PMSM (Motor Sincron cu Magneți Permanenți).

Tabelul III-1. Caracteristicile vehiculului pentru studiul distribuției complementare de sarcină

Caracteristică	Valoare	Unitate de măsură
Masa vehiculului	1200	kg
Raza roții	0.3	m
Coeficientul de rezistență aerodinamică	0.3	-
Suprafața frontală	2	m ²
Raport de transmisie de la motor la roată	6.8	-

Tabelul III-2. Resistant forces coefficients for complementary load distribution study

Coeficient	Valoare
Aderență	0.9
Rezistență la rulare	0.007

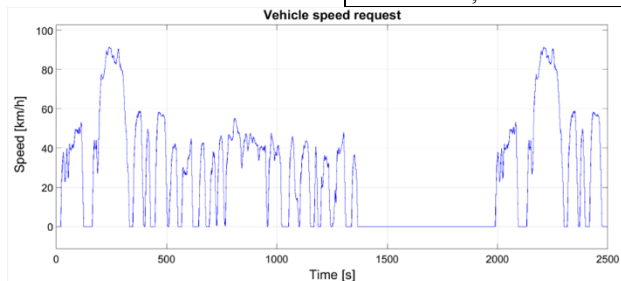


Fig. III-1. Ciclu de viteză FTP75

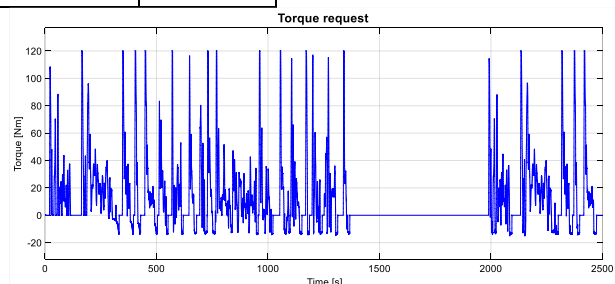


Fig. III-2. Cerința totală de cuplu pentru studiul distribuției complementare de sarcină

Respectând cerința, în loc de a folosi un singur motor pentru realizarea grupului motopropulsor al vehiculului, este posibil să se distribuie cuplul total (maximum 120 Nm) între două motoare electrice mai mici: unul care acoperă o regiune de cuplu redus (40 Nm), iar celălalt completând cuplul suplimentar necesar pentru a răspunde cererii de cuplu mai mare (80 Nm). Mașinile electrice sunt

denumite în această situație Motor 1 și Motor 2, pentru diferență față de exemplele precedente cu cele două motoare BLDC. Aplicând alocarea de sarcină complementară, Motorul 2 pornește mai întâi acoperind un cuplu maxim de 80 Nm. Când cererea de cuplu depășește capacitățile Motorului 2, Motorul 1 acoperă diferența cu un cuplu maxim de 40 Nm. De asemenea, este posibil să demareze primul cel mai mic motor, cu o acoperire a unui cuplu maxim de 40 Nm, fiind completat de Motorul 2 atunci când capacitățile Motorului 1 sunt depășite.

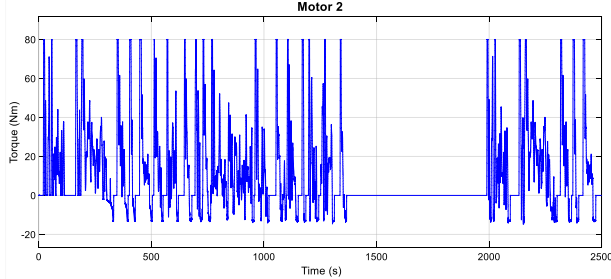


Fig. III-3. Distribuție complementară de sarcină – sarcină pentru Motorul 2, Motorul 2 pleacă primul

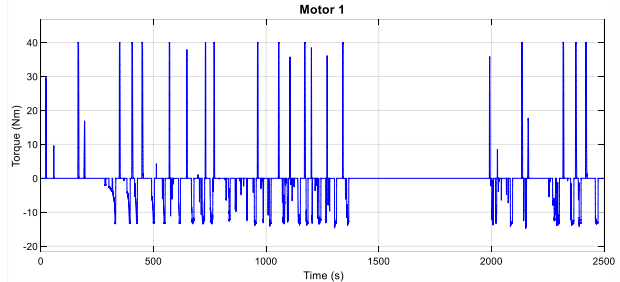


Fig. III-4. Distribuție complementară de sarcină – sarcină pentru Motorul 1, Motorul 2 pleacă primul

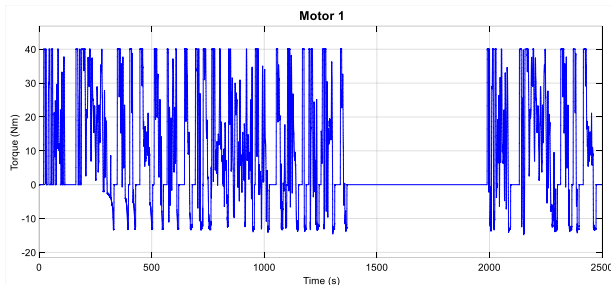


Fig. III-5. Distribuție complementară de sarcină – sarcină pentru Motorul 1, Motorul 1 pleacă primul

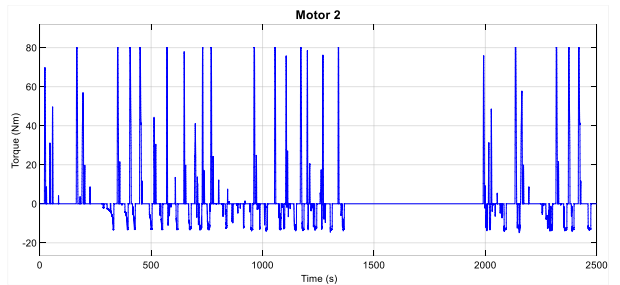


Fig. III-6. Distribuție complementară de sarcină – sarcină pentru Motorul 2, Motorul 1 pleacă primul

Consumul de energie electrică utilizată în timpul ciclului FTP75 este dat de starea de încărcare a bateriei (SOC).

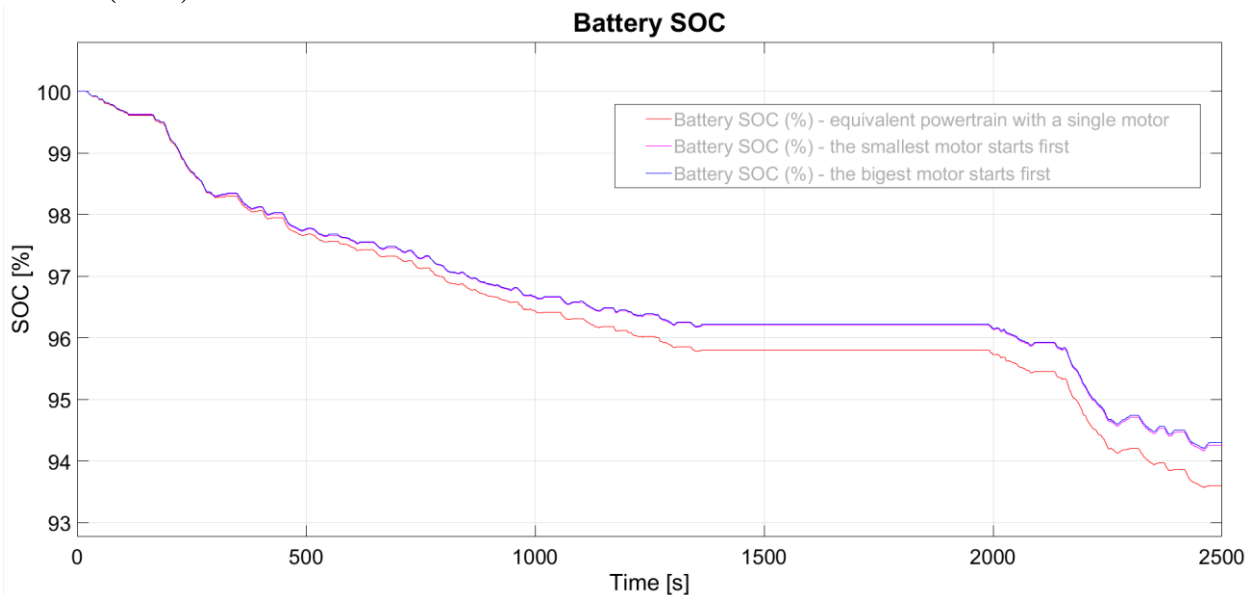


Fig. III-7. Distribuție complementară de sarcină – evoluția stării de încărcare a bateriei

Concluzii

Pentru acest exemplu, grupul motopropulsor echivalent cu un singur motor ar consuma mai multă energie decât soluția cu două motoare care utilizează o distribuție complementară a sarcinii (aproximativ 10% mai mult). Ordinea în care sunt implicate motoarele nu este lipsită de importanță și poate genera mai multă eficiență energetică (în simulare, cu aproximativ 1% mai mult).

III.1.3. Distribuții de sarcină utilizând un procent fix: procentuală, proporțională și optimă

Distribuție procentuală de sarcină

Toate motoarele participă simultan la producerea cuplului pentru orice nivel de cuplu. Raportul dintre cuplu T_m produs de motorul m , și cuplul total produs de grupul motopropulsor, T_t , are o valoare constantă și este procentul sau coeficientul de distribuție de sarcină,

$$\lambda_m = \frac{T_m}{T_t}. \quad (\text{III-1})$$

Distribuție proporțională de sarcină

Este un caz particular al distribuției procentuale de sarcină. Coeficientul de sarcină pentru motorul m este

$$\lambda_m = \frac{P_{Max_m}}{P_{tMax}}. \quad (\text{III-2})$$

unde, P_{Max_m} puterea mecanică maximă la axul motorului m , și P_{tMax} puterea maximă a grupului motopropulsor.

Distribuție optimă de sarcină

Pentru o distribuție optimă de sarcină este căutat un set de λ_m care generează un randament maxim al grupului motopropulsor. De exemplu, se consideră două motoare cu coeficienții de distribuție de sarcină λ_1 , și λ_2 . Fie $\lambda_1 = \lambda$. Motoarele au aceeași viteză unghiulară $\Omega_1 = \Omega_2 = \Omega$. Randamentul grupului motopropulsor este

$$\eta = \frac{P_{l_1} + P_{l_2}}{P_{l_1} + P_{l_2} + P_{l_1} + P_{l_2}} \quad (\text{III-3})$$

unde $P_{l_{1,2}}$ este puterea mecanică generată de fiecare motor, și $P_{l_{1,2}}$, pierderile fiecărui motor (reprezentate de pierderi Joule și pierderi în fier). Randamentul grupului motopropulsor devine

$$\eta(\lambda, T, \Omega) = \frac{\lambda T \Omega + (1 - \lambda) T \Omega}{T \Omega + R_1 \left(\frac{\lambda T}{k_{T_1}} \right)^2 + R_2 \left(\frac{(1 - \lambda) T}{k_{T_2}} \right)^2 + K_{F_1} \Omega^2 + K_{H_1} \Omega + K_{F_2} \Omega^2 + K_{F_2} \Omega}. \quad (\text{III-4})$$

unde $k_{T_{1,2}}$ este constanta de cuplu pentru fiecare motor, $K_{F_{1,2}}$, $K_{H_{1,2}}$ sunt coeficienții de pierderi prin curenți turbionari și prin histerezis, și $R_{1,2}$, rezistența electrică internă a fiecărui motor. Pentru:

$$\frac{\partial \eta(\lambda, T, \Omega)}{\partial \lambda} = 0 \Rightarrow \lambda = \frac{R_2 k_{T_1}^2}{R_1 k_{T_2}^2 + R_2 k_{T_1}^2}, \quad (\text{III-5})$$

Coeficientul distribuție optimă a sarcinii este o valoare constantă pentru grupul motopropulsor și depinde de rezistența electrică internă și constantele de cuplu ale motoarelor.

Rezultate obținute cu distribuții de sarcină folosind un procent fix

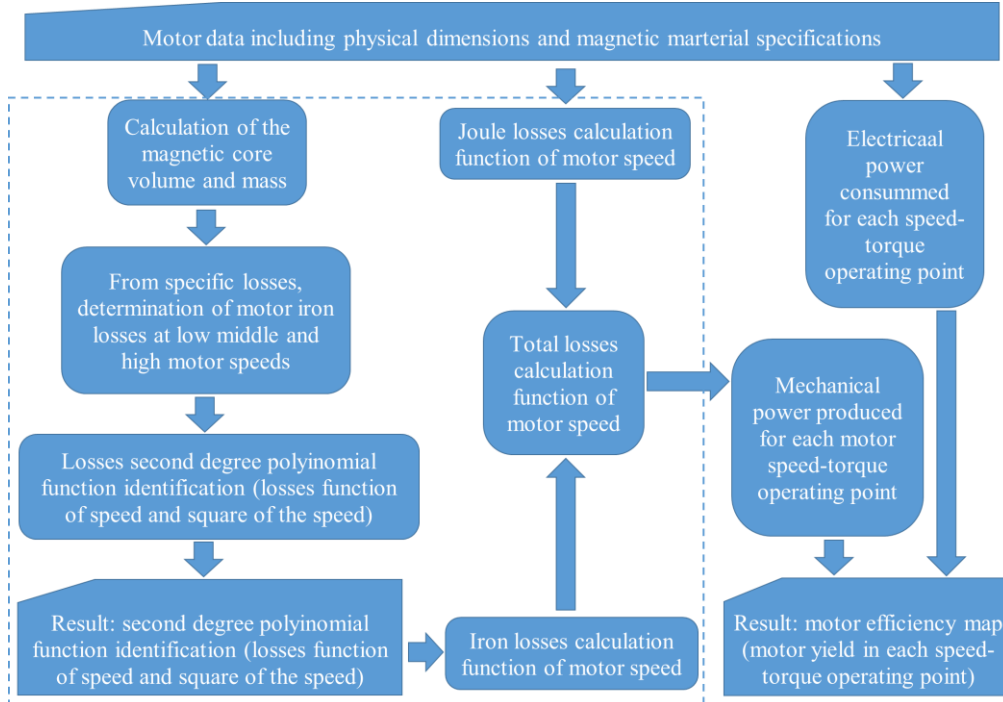


Fig. III-8. Proces de determinare a hărții de randament a motorului prin calcul analitic

Pentru a exemplifica rezultatele distribuțiilor de sarcină folosind un procent fix sunt luate în considerare motoarele din Tabelul II-3. Procesul implementat pentru determinarea hărților de eficiență este prezentat în Fig. III-8. Știind cum să calculăm pierderile în fiecare punct al zonei operaționale, este posibil să se determine randamentul motorului în fiecare punct. Rezultatul procesului ca hărți de eficiență pentru fiecare motor este prezentat în Fig. III-9. Calculul pierderilor este exemplificat în capitolul III.2.

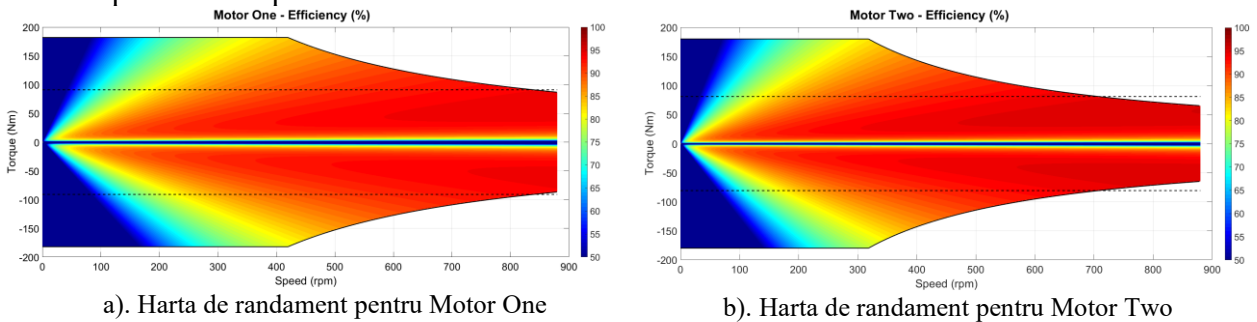


Fig. III-9. Hărțile de randament pentru fiecare motor

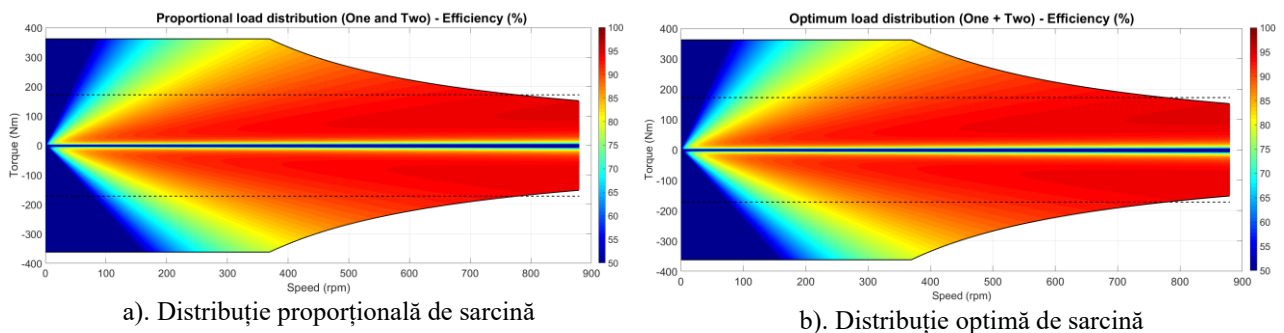


Fig. III-10. Hărțile de randament ale grupului motopropulsor pentru distribuție proporțională și optimă a sarcinii

Pentru a ilustra îmbunătățirile de eficiență cu cele două motoare, vehiculul din Tabelul II-1 este considerat în condițiile din Tabelul II-2. Fig. III-11 arată rezultatul.

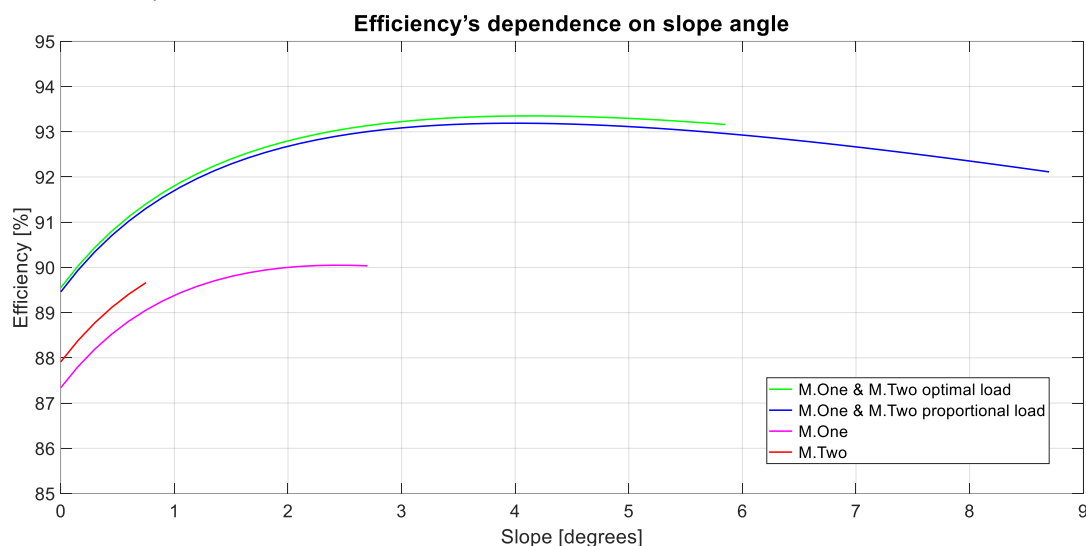


Fig. III-11. Eficiența energetică după un ciclu WLTC pentru pante de la 0° la 9°

III.2. Metoda de alocare dinamică a sarcinii

III.2.1. Definiție

Păstrând stabilitatea vehiculului, un scenariu de alocare dinamică a sarcinii poate fi definit ca un algoritm de repartizare a sarcinii între motoare, cu calcul în fiecare punct de funcționare al grupului motopropulsor, luând în considerare o decizie specifică pentru punctul de funcționare și/sau luând în considerare situațiile anterioare (viteză, cuplu.) și solicitările pentru situațiile următoare.

III.2.2. Exemplu de distribuție de sarcină bazată pe minimizarea pierderilor interne ale motoarelor

Pierderile totale

Randamentul pentru motorul m al grupului motopropulsor este

$$\eta_m = \frac{P_{t_m}}{P_{t_m} + P_{l_m}}, \quad (\text{III-6})$$

unde P_{t_m} este puterea mecanică la ax, și P_{l_m} reprezintă pierderile de putere în același motor.

Pierderile prin histerezis și curenți turbionari

Pierderilor în fier sunt dependente de viteză și pătratul vitezei,

$$P_{i_m} = K_{H_m} \Omega_m + K_{F_m} \Omega_m^2, \quad (\text{III-7})$$

unde coeficienții de pierderi prin histerezis, K_{H_m} și prin curenți turbionari, K_{F_m} , calculați pentru cele două motoare conform procesului din Fig. III-8, sunt prezentați în Tabelul II-3, rezultând valorile din următorul tabel.

Tabelul III-3. Coeficienții de pierderi în fier pentru motoarele studiate

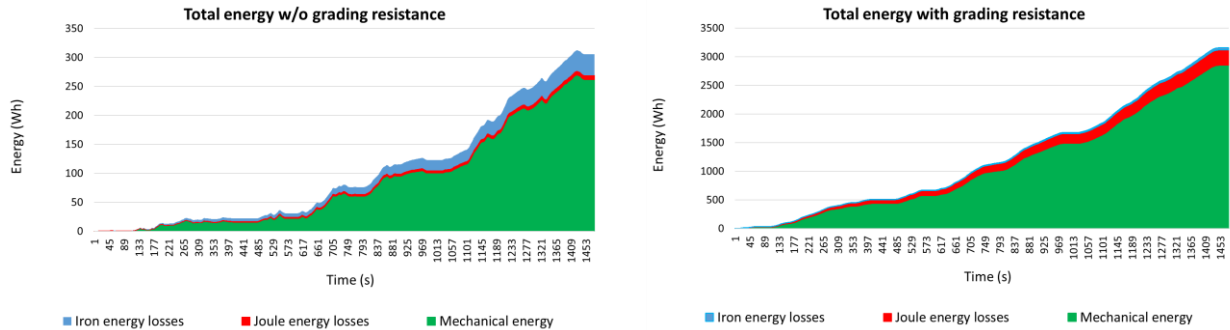
Caracteristica	Motor One	Motor Two
Coeficient de pierderi prin histerezis	0.09 W/rpm	0.06 W/rpm
Coeficient de pierderi prin curenți turbionari	0.0001 W/rpm ²	0.00009 W/ rpm ²

Ca o caracteristică a procesului de optimizare, aceste pierderi nu depind de sarcină și sunt prezente în timpul întregului ciclului de testare în funcție de viteză.

Pierderile Joule

Cunoscând rezistența internă a fiecărui motor, pentru un curent dat, se pot calcula pierderile Joule. În timpul WLTC, motoarele trebuie să acopere cererea totală de cuplu. Sub această constrângere este posibil să se găsească pentru fiecare punct de operare un cuplu de curenți I_1 , I_2 , minimizând pierderile Joule:

$$\min(P_{J}) = \min(R_1 I_1^2 + R_2 I_2^2). \quad (\text{III-8})$$



a). pe o suprafață plană cu minimizarea pierderilor

a). pe rampă de 15° cu minimizarea pierderilor

Fig. III-12. Energia totală în timpul ciclului WLTC

Concluzii

În ceea ce privește energia totală utilizată în timpul ciclului de testare, rezultatele obținute pentru minimizarea pierderilor au fost comparate cu rezultatele când Motor One a acoperit în orice moment 60% din sarcină și Motor Two, 40%. Eficiența energetică este îmbunătățită cu 0,2% pe o suprafață plană și cu 3,4% pe o pantă de 15 grade. Acoperirea întregului WLTC pe o pantă de 15 grade este, în acest caz, o presupunere teoretică pentru a ilustra influența curenților mai mari de motor pentru această metodă, deoarece pierderile în fier nu sunt influențate de unghiul pantei.

III.3. Metoda de alocare mixtă a sarcinii

III.3.1. Definiție

O alocare mixtă a sarcinii este o metodă care combină aplicarea metodelor de alocare de sarcină statice și dinamice.

III.3.2. Extinderea capacităților vehiculului folosind distribuția mixtă a sarcinii

Revenind la cazul ilustrat în Fig. III-11, curba de distribuție optimă a sarcinii se oprește față de cea proporțională, la un unghi de pantă mai mic. Pentru distribuția proporțională a sarcinii, motoarele, cel puțin teoretic, ajung la limitele lor în același timp. Unghiul maxim de pantă încercat folosind o distribuție proporțională a sarcinii este utilizat pentru a înțelege situația. La acest unghi, dacă se aplică distribuția optimă a sarcinii: grupul motopropulsor își atinge limitele (Fig. III-13), Motor One mai are rezerve și poate continua să fie încărcat, Motor Two este supraîncărcat (Fig. III-14). Repartiția optimă a sarcinii nu mai poate fi aplicată. Pe măsură ce grupul motopropulsor continuă să aibă rezerve de la Motor One, se poate mări unghiul pantei. Soluția combină o alocare statică a sarcinii până când Motor Two își atinge limitele și, după, o alocare dinamică, Fig. III-15.

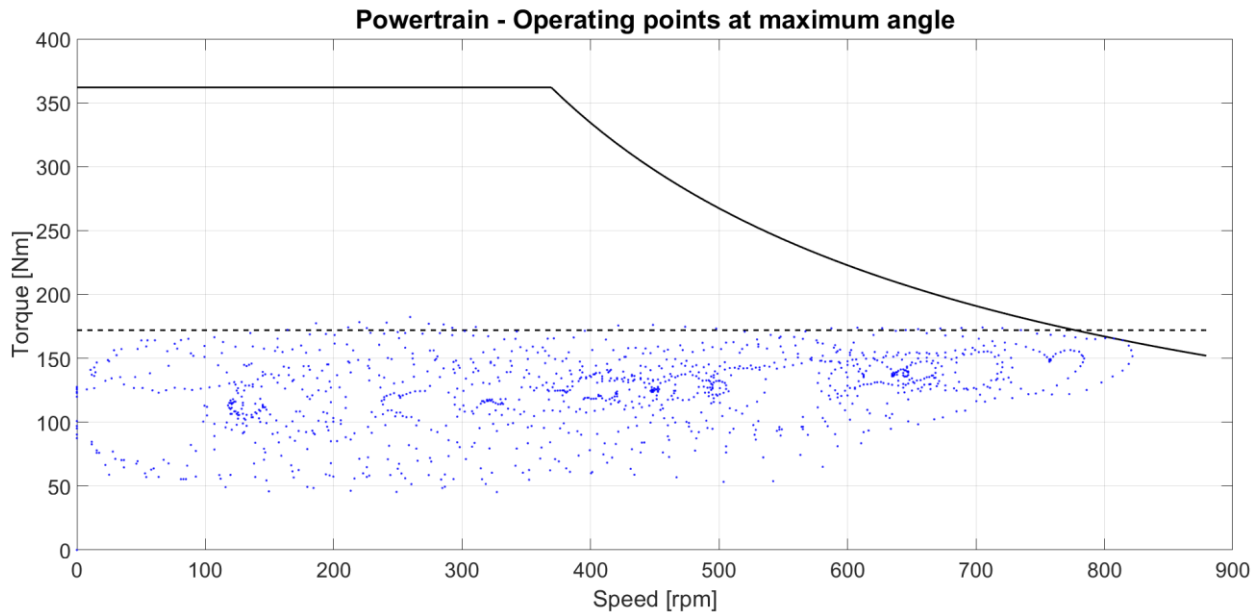
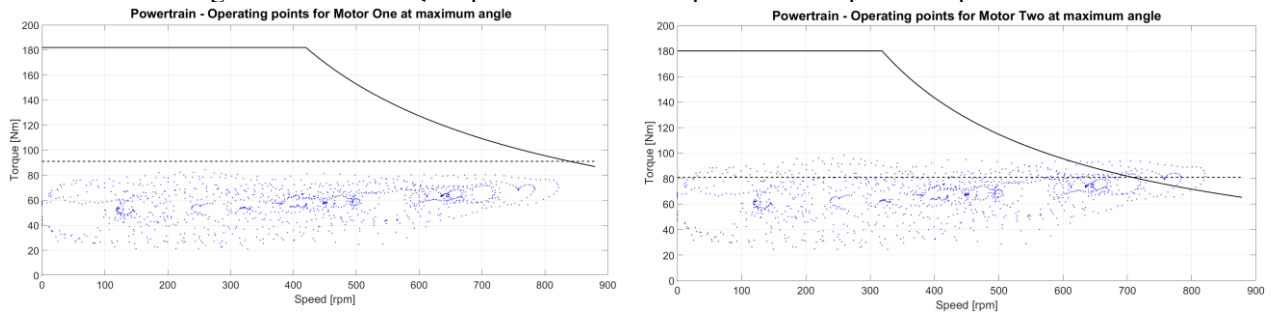


Fig. III-13. Distribuția optimă de sarcină – punctele de operare la panta maximă



a). punctele de operare ale Motor One la panta maximă b). punctele de operare ale Motor Two la panta maximă

Fig. III-14. Distribuția optimă de sarcină

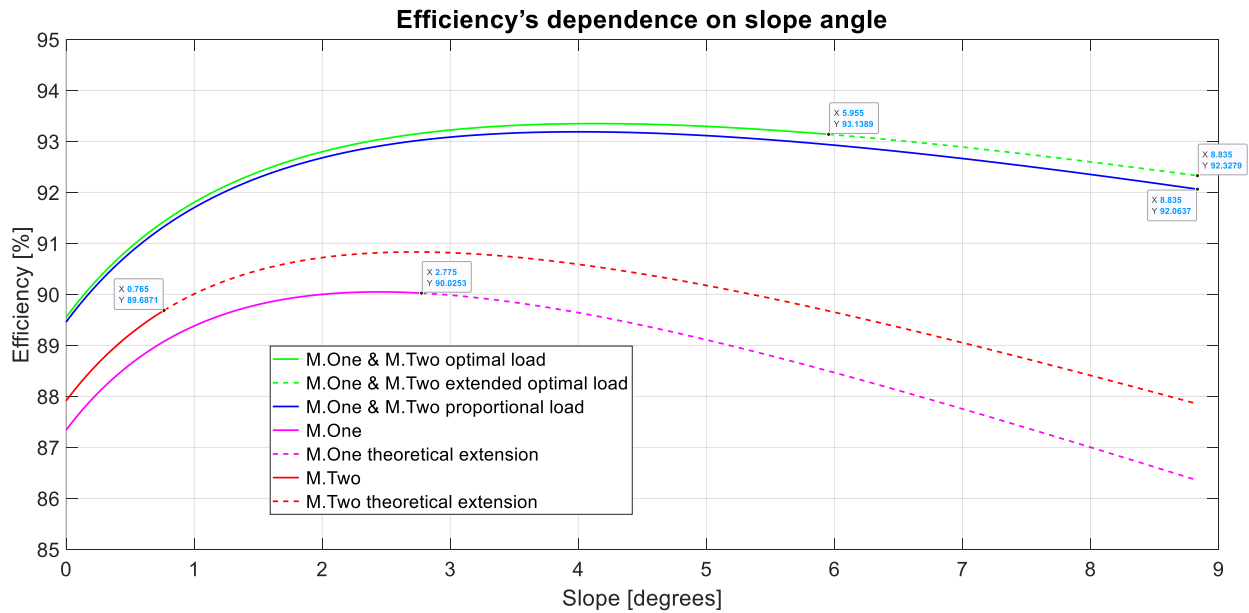


Fig. III-15. Eficiența energetică după un WLTC întreg pentru unghiuri de pantă de la 0° la 9° cu extinderea distribuției optime a sarcinii

Concluzii

Avantajele unei soluții multimotor sunt din nou prezentate, de data aceasta într-o alocare mixtă a sarcinii între motoare. S-a realizat o extindere a utilizării vehiculului până la limitele superioare ale motoarelor electrice. Pentru a face testul mai sever, o forță rezistentă la urcare a fost luată în considerare printr-un unghi de pantă în creștere, iar grupul motopropulsor al vehiculului a fost optimizat utilizând distribuții statice, dinamice și mixte de încărcare.

III.4. Limite fizice ale grupului motopropulsor

Vehiculul din Tabelul II-1 în condițiile din Tabelul II-2 este considerat pentru următorul studiu. Motoarele din Tabelul II-3 participă la grupul motopropulsor. În cazul în care vehiculul are atașată o masă remorcabilă, iar masa remorcabilă nu are un grup motopropulsor dedicat, efortul de tracțiune trebuie să acopere și forțele rezistente provenite de la aceasta. Luând în considerare cuplul maxim, puterea maximă a grupului motopropulsor și forța de tracțiune $P_{t_{max}}$, $T_{t_{max}}$, $F_{t_{max}}$, aceasta din urmă trebuie să satisfacă condițiile: $F_t \leq F_{t_{max}}$, $F_t \leq T_{t_{max}} / r_w$, $F_t \leq P_{t_{max}} / \Omega_w r_w$, unde r_w și Ω_w sunt raza și viteza unghiulară ale roții. Limitele legate de masa remorcată sunt prezentate în figura următoare.

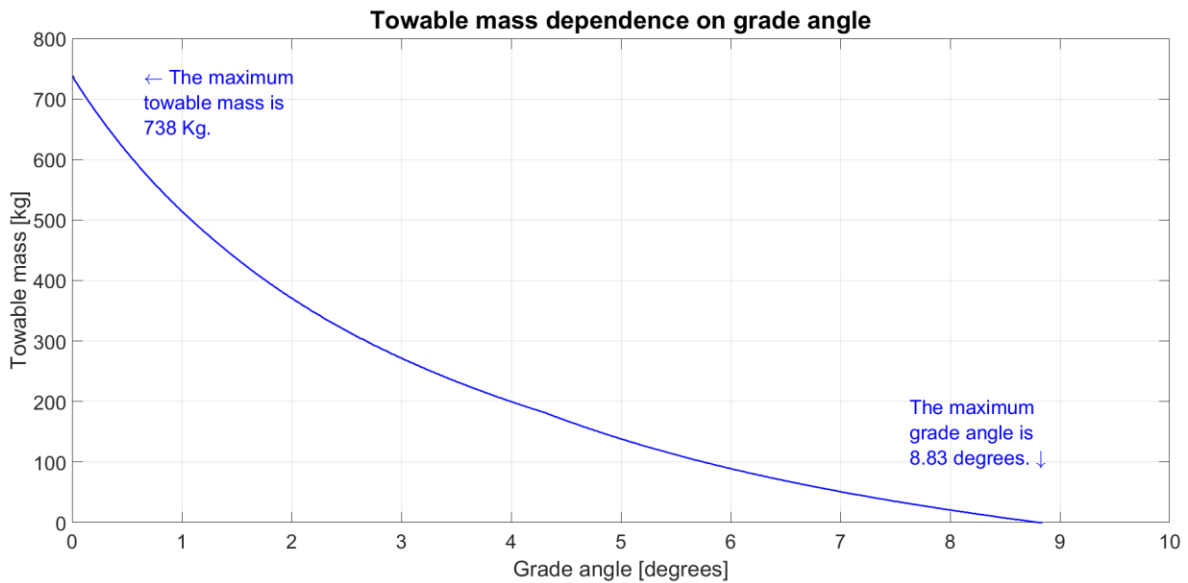
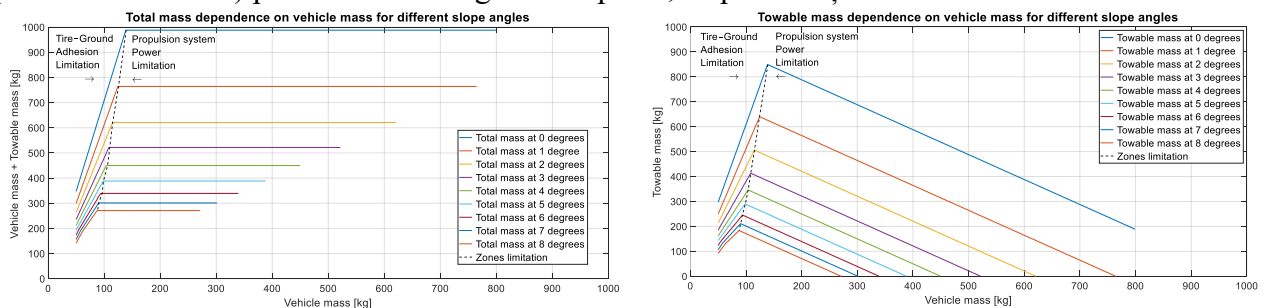


Fig. III-16. Influența pantei asupra masei remorcate

Pe o suprafață plană rezultă că vehiculul poate tracta o masă de 738 Kg respectând WLTC (aproape de trei ori masa vehiculului). Având în vedere că masa minimă a vehiculului de bază este de 50 kg, următoarea figură prezintă dependența dintre masa vehiculului de bază și masa totală a ansamblului (vehicul + remorcă) pentru diferite unghiuri de pantă, respectând și în totalitate WLTC.



a). dependența masei vehiculului de masa totală

b). dependența masei vehiculului de masa remorcată

Fig. III-17. Limitele grupului motopropulsor pentru ansamblu (vehicul + remorcă), pante de la 0° la 8°

III.5. Concluzii

Simulările realizate în cadrul cercetării prezentate în acest capitolul au permis atingerea unui dublu obiectiv: acela de a confirma impactul pozitiv al utilizării grupurilor motopropulsoare multimotoare în ceea ce privește eficiența energetică la bord și de a compara rezultatele obținute prin diferite metode. Pierderile interne ale motoarelor electrice au fost calculate folosind principalele caracteristici și dimensiunile fizice ale motoarelor. De asemenea, a fost prezentată metoda și calculul pentru coeficienții pierderilor de fier în funcție de turația motorului și pătratul turației motorului. Au fost identificate și analizate mai multe metode de alocare a sarcinii între motoare: statică (cu distribuții complementare, procentuale, proporționale și optime), dinamică (pe baza situațiilor trecute și viitoare, folosind minimizarea pierderilor interne ale motoarelor) și mixtă. Distribuția optimă a sarcinii funcționează mai bine, dar apropierea limitei superioare a motoarelor trebuie supravegheată deoarece metoda poate avea o zonă de aplicare mai restrânsă decât cea proporțională. Pentru a depăși această limită, poate fi aplicată cu succes o alocare mixtă a sarcinii. Au fost generate hărți de eficiență pentru ambele cazuri și, de asemenea, pentru fiecare motor în parte. Îmbunătățirea este mai vizibilă pe o reprezentare a eficienței la creșterea pantei. În completare, la final, a fost prezentată o nouă metodă de explorare a capacităților vehiculului pornind de la caracteristicile grupului motopropulsor. Aceasta reprezintă construcția limitelor fizice ale vehiculului în ceea ce privește masa vehiculului și masa remorcabilă pentru diferite unghiuri de pantă, sub constrângerea de a respecta în întregime un ciclu de testare dat.

IV. TEHNICI DE OPTIMIZARE PENTRU SISTEME DE PROPULSIE CU MOTOARE BLDC

IV.1. Realizarea modelului motorului

Back EMF în motor BLDC trifazat

O construcție obișnuită a motorului prezintă trei faze. Motoarele BLDC sunt proiectate pentru a dezvolta back EMF trapezoidal, așa cum este reprezentat în Fig. IV-1. Între cele trei faze, back EMF este deplasat cu 120 de grade electrice.

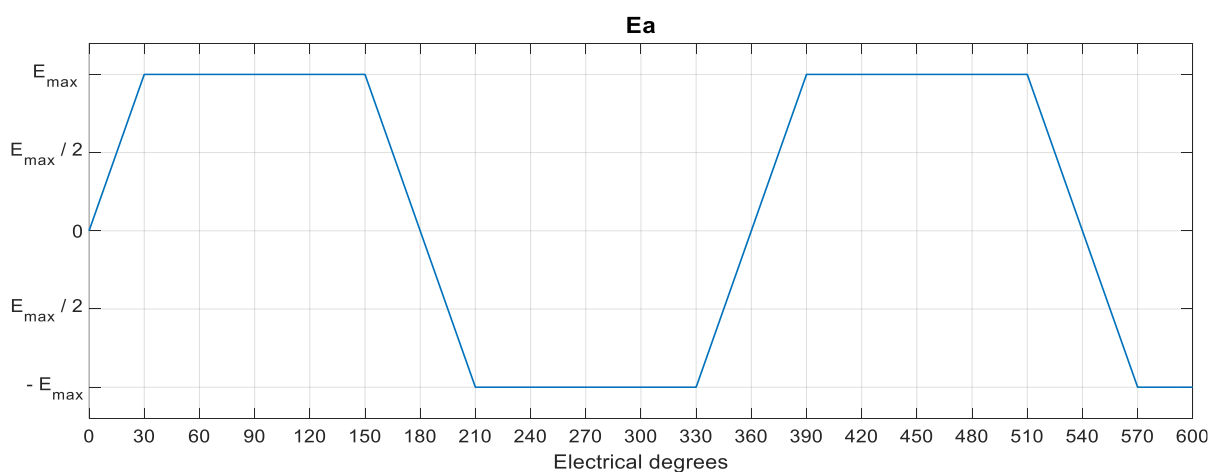


Fig. IV-1. Back EMF pentru faza a

Model motor BLDC

Modelarea sistemului mecanic

Cuplul electromagnetic T_E , este raportul dintre puterea electromagnetică și viteza unghiulară a rotorului. Folosind motorul într-un sistem de propulsie al vehiculului, acesta trebuie să acopere cererea de cuplu

$$T_E = F_c \Omega + T_{f0} + T_{load} + J \frac{d\Omega}{dt}, \quad (IV-1)$$

unde, F_c coeficientul de frecări vâscoase pentru motor și sarcină și T_{f0} cuplul static de frecări (ambele acoperă pierderile de putere în funcție de viteză și pătratul vitezei), T_{load} este cuplul de sarcină cerut ca vehiculul să acopere rezistența aerodinamică, frecarea la înaintare și forța de rezistență la pantă, J este momentul de inerție al rotorului și sarcinii, Ω este viteza unghiulară a rotorului. Considerând θ poziția unghiulară a rotorului:

$$\Omega = \frac{d\theta}{dt}. \quad (IV-2)$$

IV.2. Curenți ideali și reali ai motorului

Prin simulare la 500 rpm se obține o formă dreptunghiulară pentru curentul impus (ideal) al fazei a, ia-ref, dar nu și pentru curentul real ia. Ca rezultat, cuplul electromagnetic din mașină fluctuează în jurul unei valori medii și comutația de fază generează undulații de cuplu, așa cum se arată în Fig. IV-4.

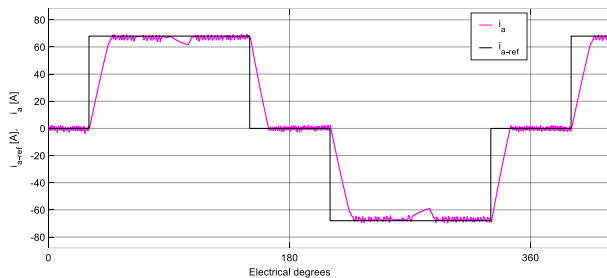


Fig. IV-2. Influența comutației fazelor asupra curentului de fază

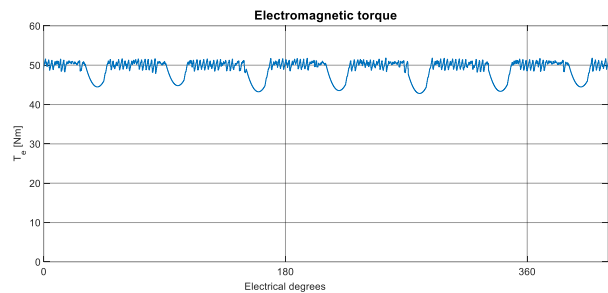
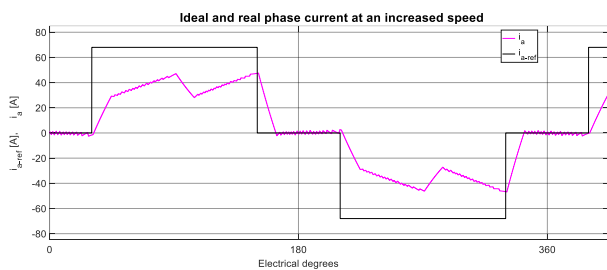


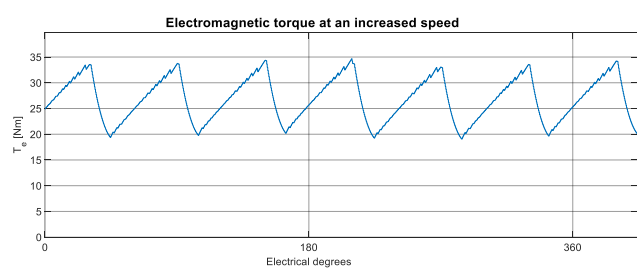
Fig. IV-3. Cuplul electromagnetic din motor

Efectul creșterii vitezei

Pentru același motor, viteza a fost mărită de la 500 rpm la 750 rpm. În consecință, există o limitare importantă a cuplului electromagnetic și undulațiile acestuia cresc semnificativ.



a). curent



b). cuplu

Fig. IV-4. Efectul unei viteze de 750 rpm

IV.3. Aplicarea metodelor Phase Advance și Dwell Control

Privind la figura precedentă, dacă faza a este alimentată înainte de momentul în care back EMF a atins valoarea maximă, se favorizează creșterea curentului prin faza a. În acest caz, impulsul de curent de fază ideal poate fi avansat cu 60 de grade și poate dura maxim 180 de grade. Tehnica de avansare a semnalului de comutație pentru a deschide curentul de fază se numește **Phase Advance (PA)**.

Tehnica de întârziere a semnalului de comutație pentru oprirea curentului de fază se numește **Dwell Control (DC)**. **Diferența față de cercetările precedente constă în propunerea unui sistem de propulsie cu două motoare BLDC identice, încercând să se folosească o configurație adecvată celui mai mic.** Fiecare motor are caracteristicile specificate în Tabelul IV-1.

Tabelul IV-1. Caracteristicile motoarelor pentru investigațiile PA și DC

Caracteristica	Valoare
Putere nominală	3 kW
Putere maximă	5,4 kW
Tensiune nominală	72 V
Număr de perechi de poli	16
Curent nominal	68 A
Turație nominală	650 rpm
Turație fără sarcină	860 rpm
Rezistența electrică de fază	0.027 Ω
Inductanța fazei	0,15 mH

Model MATLAB-Simulink pentru investigarea ariei operaționale

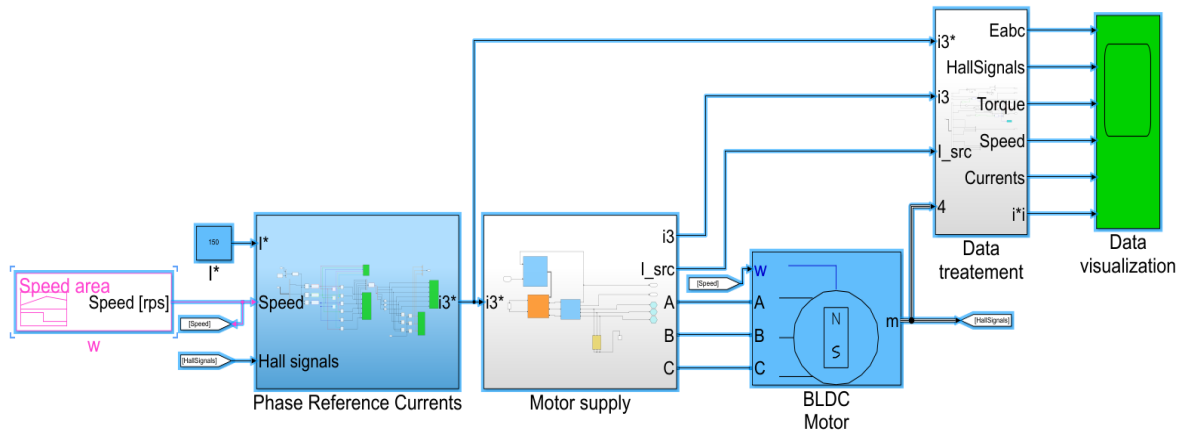


Fig. IV-5. Implementare Simulink pentru acoperirea ariei operaționale

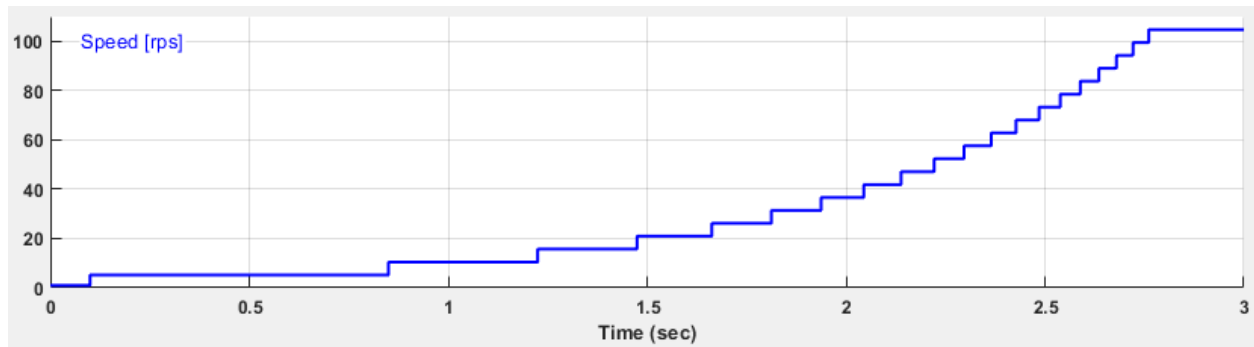


Fig. IV-6. Profil de viteză pentru investigarea ariei operaționale

Blocul „Phase Reference Currents” bazat pe viteza motorului și semnalele Hall, generează forma dreptunghiulară ideală a curenților de fază cu un defazaj de 120 de grade. Amplitudinea este valoarea impusă pentru curentul furnizat de sursă. Figura următoare prezintă forma semnalelor Hall și a curenților de referință pentru un curent impus la valoarea nominală (68 A). În „Motor supply”, inverterul conectat la sursa de tensiune primește impulsurile de comutație de la regulator. Regulatorul compară pentru fiecare fază curentul real cu curentul de referință și generează impulsurile de comutație. „BLDC Motor” simulează un motor sincron cu back EMF trapezoidal, cu magneți

permanenți, alimentat în curent continuu. Blocul „Data treatment” generează datele pentru investigație. Din cuplul electromagnetic, scăzând cuplul de frecare intern și cuplul de pierderi în fier, rezultă cuplul la arborele mașinii. Aplicând metoda prezentată în capitolul III se obține cuplul static de frecări $T_{f0} = 0.89 \text{ Nm}$ și coeficientul de frecări vâscoase $F_c = 0.021 \text{ Nms}$. Un invertor MOSFET/Diode („Power electronics block” in Fig. IV-7) alimentează motorul.

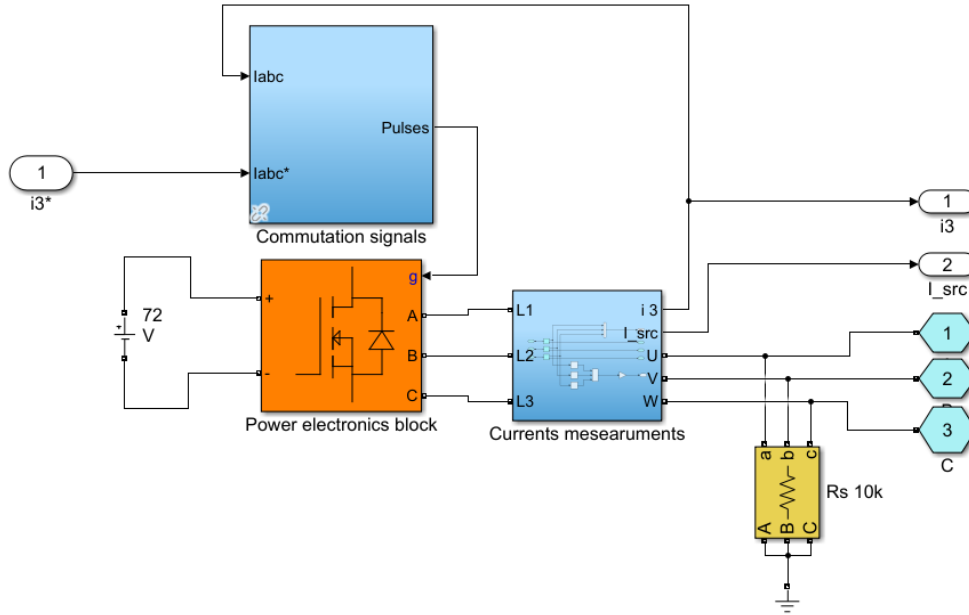


Fig. IV-7. Blocul „Motor Supply”

Cerința vehiculului pentru acoperirea ariei operaționale

Puterea maximă a motorului (5,4 kW) se obține la turația de $n = 550 \text{ rpm}$ și pentru un curent maxim $I = 136 \text{ A}$. Punctele de operare solicitate pentru sistemul de propulsie se suprapun ariei operaționale generate de cele două motoare identice. Rezultatele sunt prezentate în Fig. IV-9 fără forță de rezistență la pantă și respectiv în Fig. IV-10, la o pantă de unsprezece grade. Fără rezistență la pantă, punctul de funcționare la 800,6 rpm solicită un cuplu de 53,6 Nm. Rulând simularea la această viteză pentru curentul maxim ca referință (136 A), sistemul de propulsie cu două motoare identice poate furniza doar 25,75 Nm. Impunerea unui curent de referință mai mare nu va modifica curentul din motor.

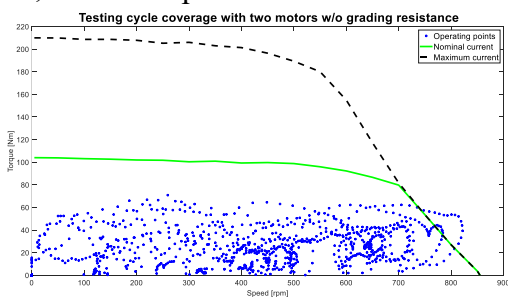


Fig. IV-8. Aria operațională a sistemului de propulsie și punctele de operare fără pantă

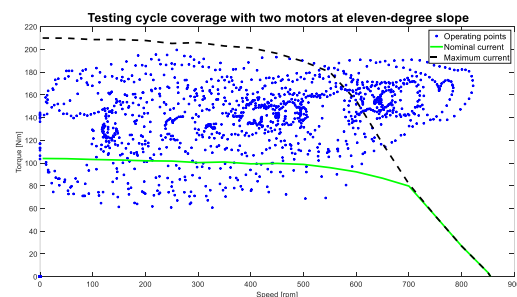


Fig. IV-9. Aria operațională a sistemului de propulsie și punctele de operare cu pantă de 11°

Situația se agravează pentru un unghi de pantă de 11 grade. **În acest context, cercetarea nu se va face prin înlocuirea unuia dintre motoare cu altul mai convenabil pentru a acoperi regiunea de mare viteză. Ambele motoare identice sunt păstrate, iar PA și DC sunt aplicate pentru optimizare.**

Implementarea metodelor PA și DC pentru investigații

Principalele componente ale schemei de implementare sunt prezentate în Fig. IV-8.

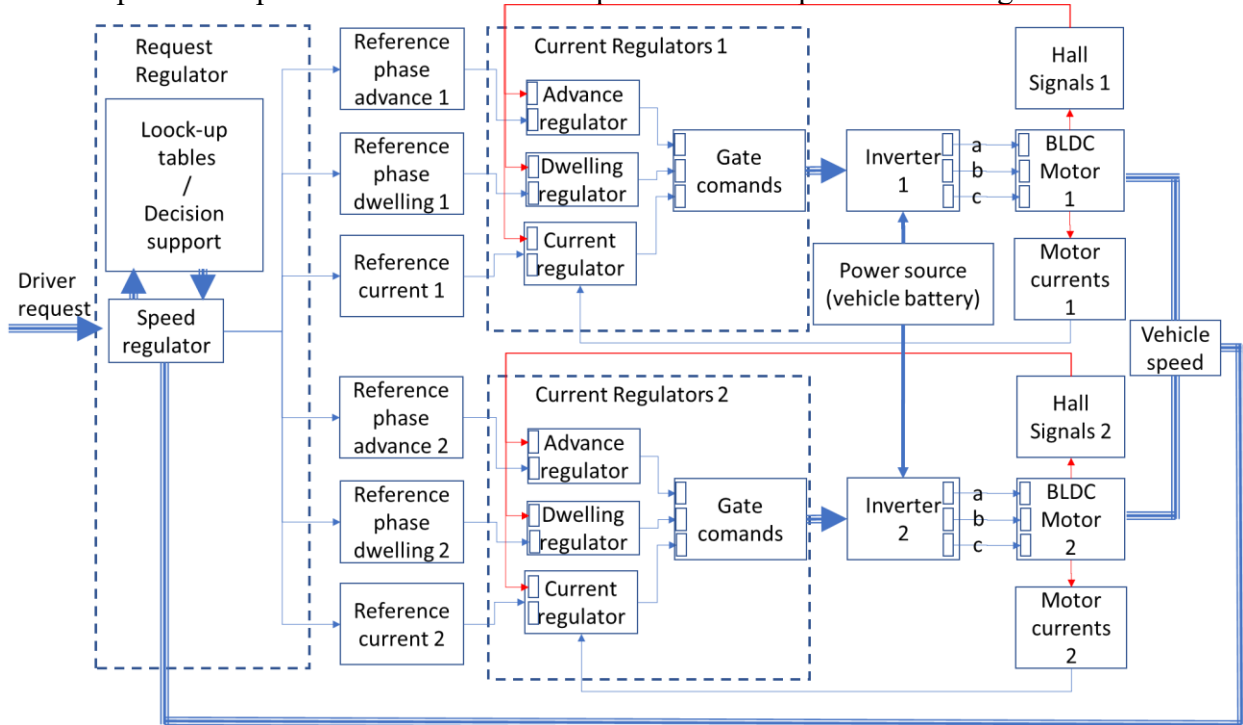


Fig. IV-10. Schema de implementare pentru analiza metodelor PA și DC

Modele matematice pentru implementarea PA și DC în MATLAB-Simulink

La un unghi, α_{adv} în grade electrice (max 60°), corespunde un avans de fază, τ_{adv} , în secunde. Când semnalul Hall trece la "1", următoarea trecere a curentului de referință de la 0 la I_{a-ref} , este întârziată cu

$$\tau - \tau_{adv} = \frac{2\pi}{p \cdot \Omega} \cdot \frac{360 - \alpha_{adv}}{360}, \quad (IV-3)$$

unde p este numărul de perechi de poli și Ω viteza unghiulară ale mașinii. Metoda DC constă în extinderea perioadei de conducție cu max 60° ; uzual aceasta este de 120 de grade electrice, sau $\tau/3$ secunde. Aplicând un unghi DC, α_{dwl} , conducția se extinde cu τ_{dwl} secunde. Dependența între prelungirea τ_{adv} , și unghiul DC, α_{dwl} , este

$$\tau_{dwl} = \frac{2\pi}{p \cdot \Omega} \cdot \frac{\alpha_{dwl}}{360}. \quad (IV-4)$$

IV.4. Concluzii

Acest capitol a introdus metodele PA și DC aplicate în comutația tensiunii de alimentare între fazele motorului, explicând perioadele de comutație și impacturile ulterioare. Pe baza simulării, rezultatele sunt confirmate. A fost explicată metodologia de implementare și a fost introdus modelul matematic pentru calculul unghiului PA și DC pentru construirea modelului Simulink. Îmbunătățirile obținute cu ajutorul acestor metode sunt prezentate în capitolul următor.

V. INFLUENȚA METODELOR PA ȘI DC ASUPRA SISTEMELOR DE PROPULSIE CU MOTOARE BLDC

V.1. Acoperirea zonei operaționale cu PA

Pentru simplificare, se consideră că la fiecare motor al grupului de propulsie se aplică același unghi de comandă PA și se utilizează metoda pornind de la o turație a motorului de 50 rpm.

Rezultate pentru curent de referință la valoare maximă

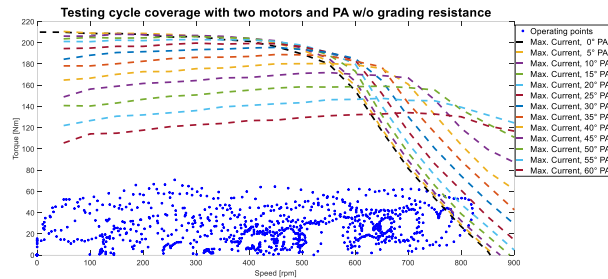


Fig. V-1. Influența unghiului PA asupra acoperirii zonei operaționale, fără pantă

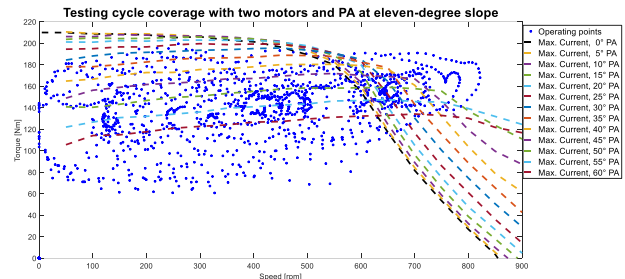


Fig. V-2. Influența unghiului PA asupra acoperirii zonei operaționale, cu pantă de 11°

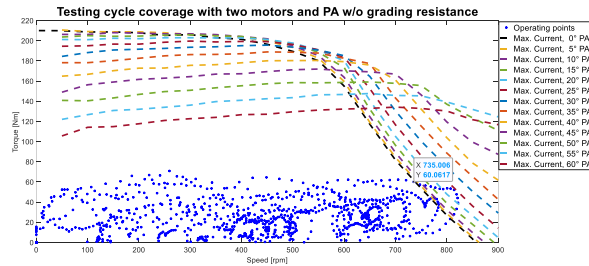


Fig. V-3. Acoperire zonei operaționale cu un unghi PA de 25° la mai mult de 735 rpm, fără pantă

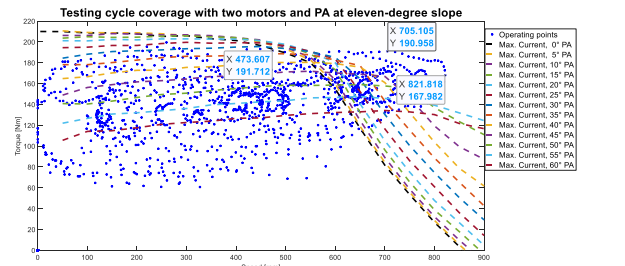


Fig. V-4. Zona operațională cu PA – limite pentru punctele de operare neacoperite

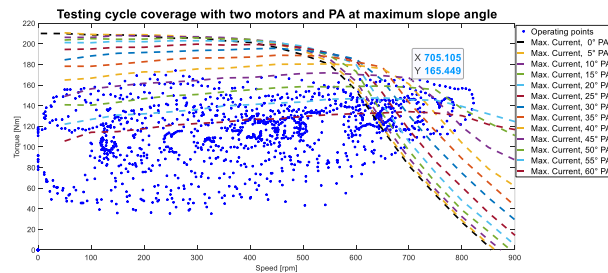


Fig. V-5. Zona de operare cu PA – unghi maxim de pantă (8,8°) pentru acoperirea cuplului maxim local la viteze mari

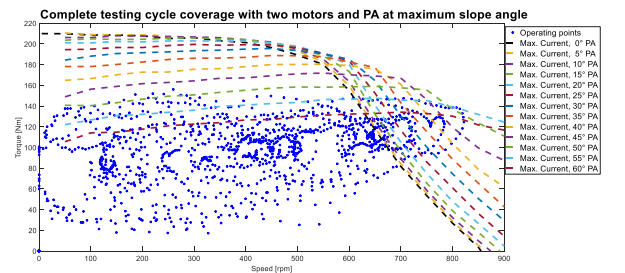


Fig. V-6. Acoperire completă a zonei operaționale cu PA pentru un unghi maxim de pantă de 7,2°

Rezultate pentru curent de referință la valoare nominală

Zona operațională este acoperită pentru un unghi PA de 25°. Din datele rezultate se determină că aplicarea PA ar fi necesară pentru viteze mai mari decât 735 rpm.

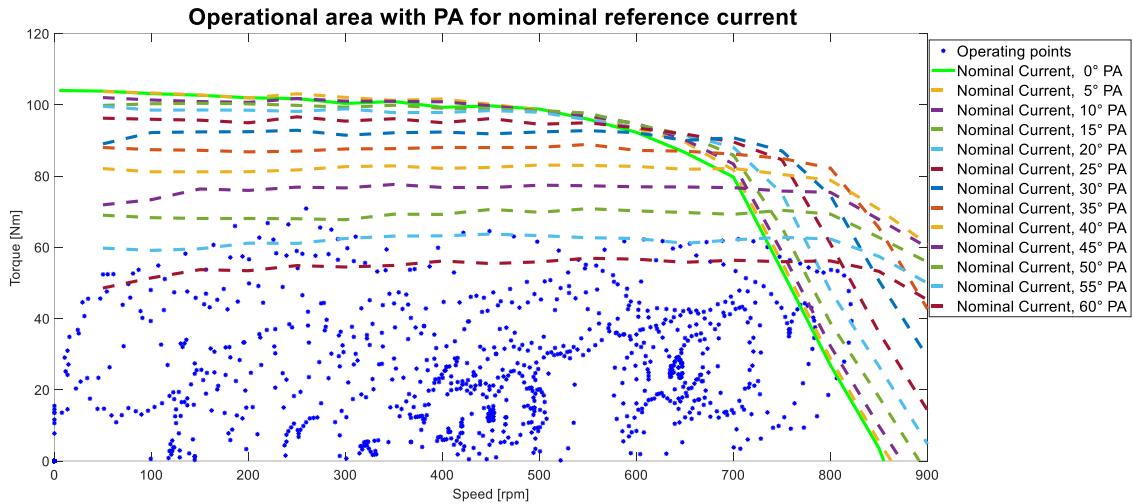


Fig. V-7. Acoperirea punctelor de operare folosind PA pentru curentul de referință nominal

Investigații asupra vitezei maxime

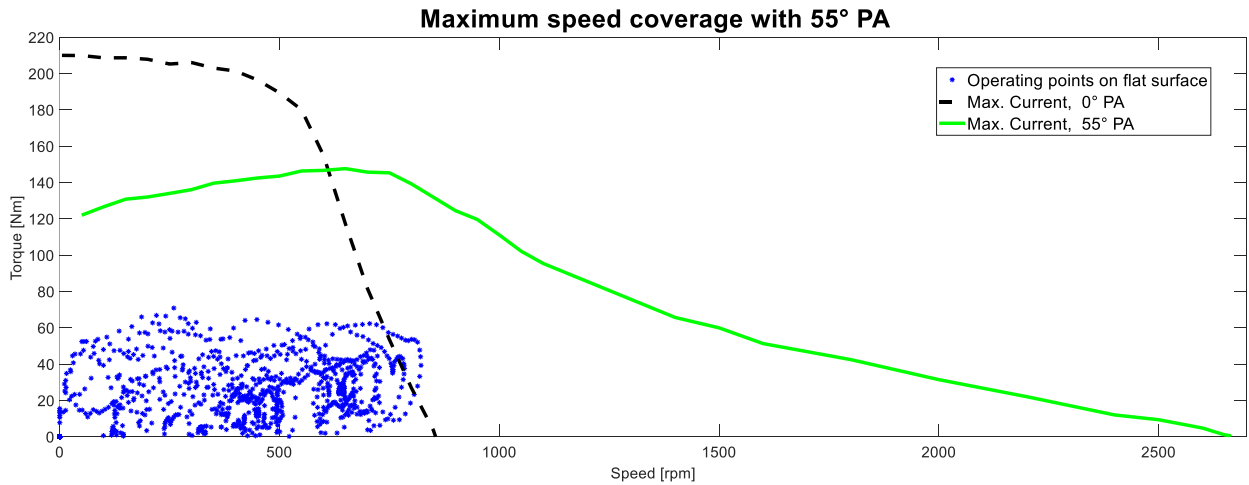


Fig. V-8. Acoperirea punctelor de operare folosind PA pentru curentul de referință maxim

Influență asupra curentilor din motor

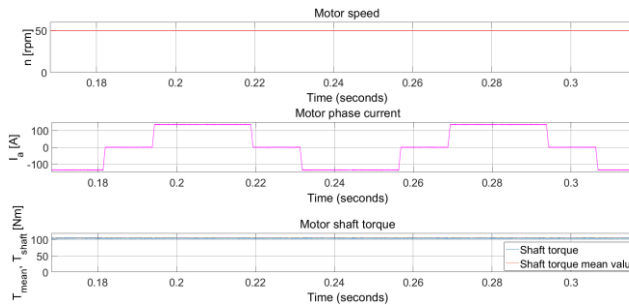


Fig. V-9. Curent de fază și cuplu pentru curent de referință maxim (136 A), fără PA, la 50 rpm

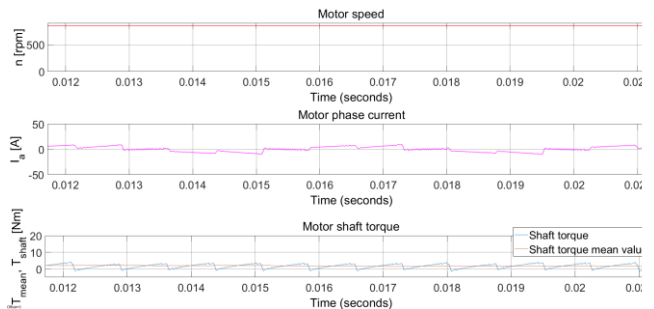


Fig. V-10. Curent de fază și cuplu pentru curent de referință maxim (136 A), fără PA, la 850 rpm

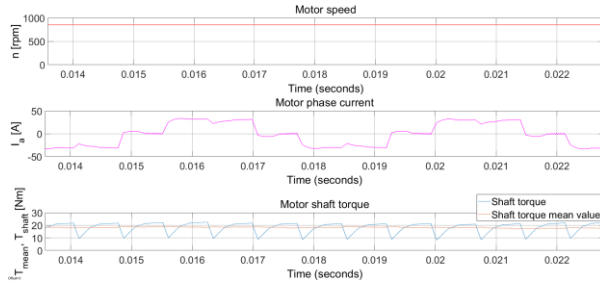


Fig. V-11. Curent de fază și cuplu pentru curent de referință maxim (136 A) și 25° PA, la 850 rpm

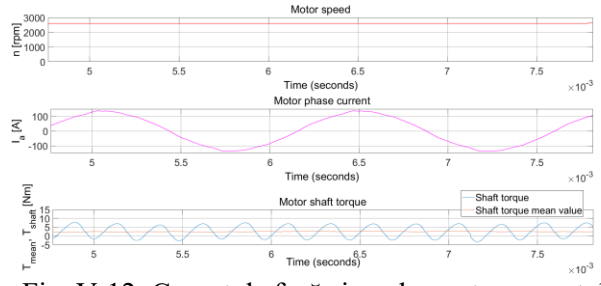


Fig. V-12. Curent de fază și cuplu pentru curent de referință maxim (136 A) și 55° PA la 2600 rpm

V.2. Acoperirea zonei operaționale completând PA cu DC

Rezultate pentru curent de referință la valoarea maximă și la valoarea nominală

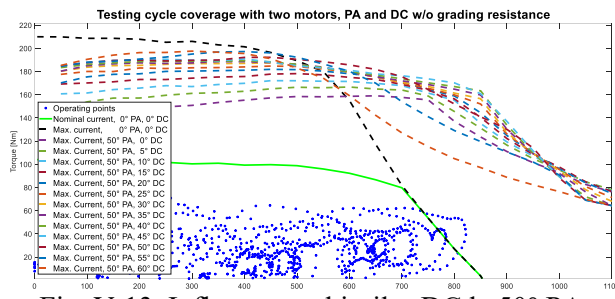


Fig. V-13. Influența unghiurilor DC la 50° PA asupra acoperirii zonei operaționale, fără pantă

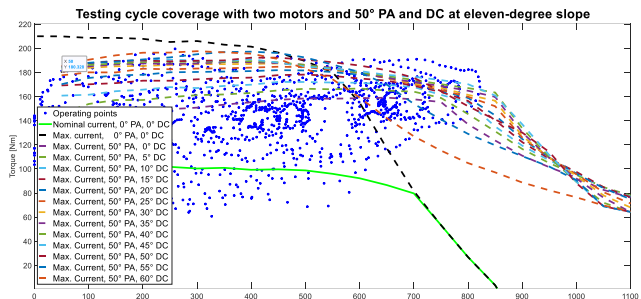


Fig. V-14. Influența unghiurilor DC la 50° PA asupra acoperirii zonei operaționale, cu pantă de 11°

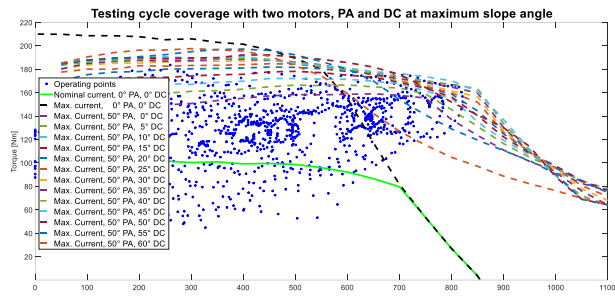


Fig. V-15. Acoperirea completă a zonei operaționale la 50° PA și DC pentru pantă maximă de 9.6°

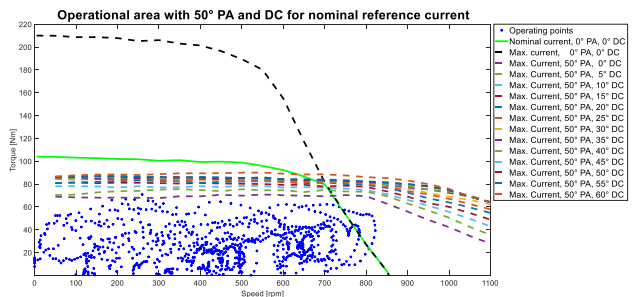


Fig. V-16. Acoperirea punctelor de operare la 50° PA și DC pentru curent de referință nominal

Influență asupra curentilor din motor

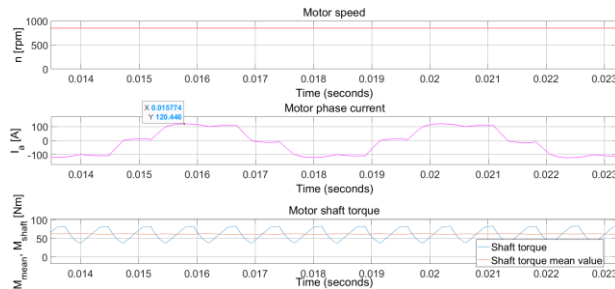


Fig. V-17. Curent de fază și cuplu pentru curentul de referință maxim (136 A) la 850 rpm, 50° PA, 0° DC

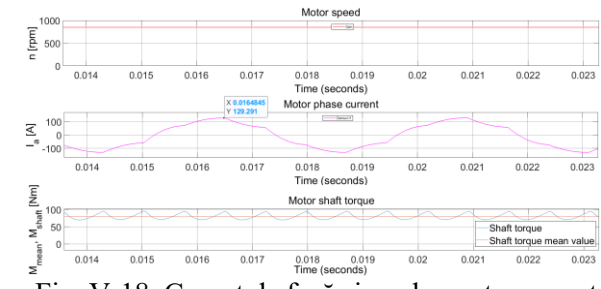


Fig. V-18. Curent de fază și cuplu pentru curentul de referință maxim (136 A) la 850 rpm, 50° PA, 45° DC

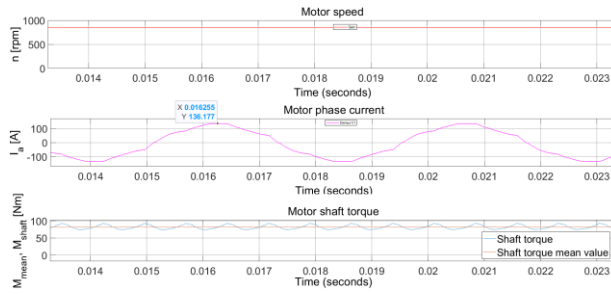


Fig. V-19. Curent de fază și cuplu pentru curentul de referință maxim (136 A) la 850 rpm, 55° PA, 45° DC

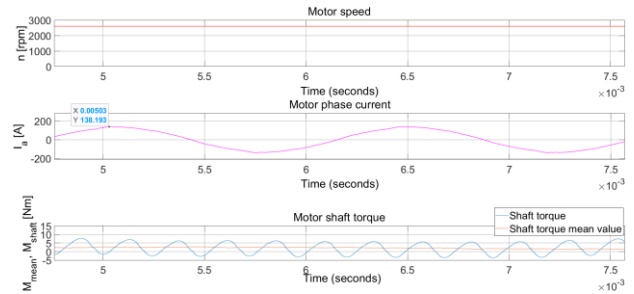


Fig. V-20. Curent de fază și cuplu pentru curentul de referință maxim (136 A) la 2600 rpm, 55° PA, 45° DC

V.3. Impact asupra cuplului generat de sistemul de propulsie

Maximizarea cuplului

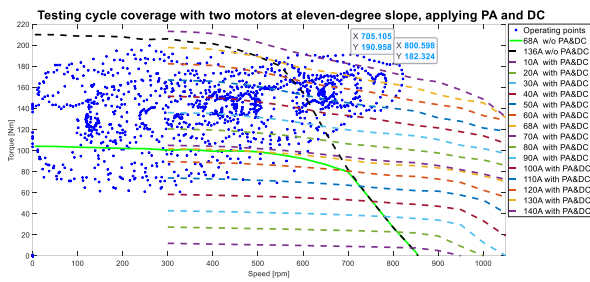


Fig. V-21. Curbe de cuplu maxim folosind PA și DC pentru niveluri de curent de referință de la 0 la 140 A cu pantă

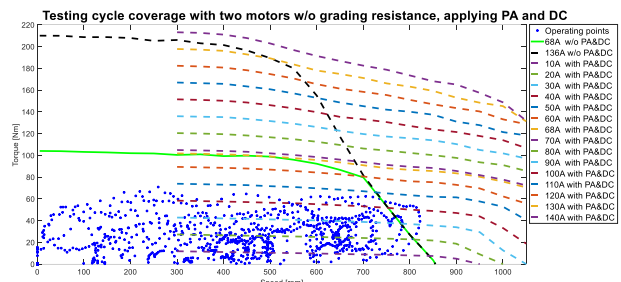


Fig. V-22. Curbe de cuplu maxim folosind PA și DC pentru niveluri de curent de referință de la 0 la 140 A fără pantă

Tabelul V-1. Perechi de unghiuri PA-DC pentru acoperirea WLTC la 50 A

Turație [rpm]	300	350	400	450	500	550	600	650	700	750	800	850	900	950	1000
Unghi PA [°]	15	15	15	15	20	20	20	25	30	35	35	35	45	45	45
Unghi DC [°]	15	15	10	15	15	15	20	25	20	20	15	50	60	60	60

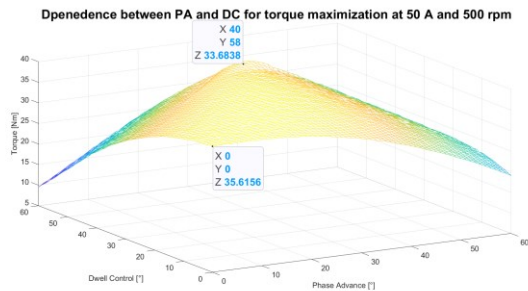


Fig. V-23. Dependența dintre unghiurile PA și DC pentru maximizarea cuplului la 50 A și 500 rpm

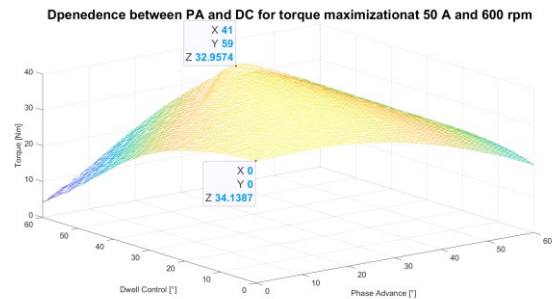


Fig. V-24. Dependența dintre unghiurile PA și DC pentru maximizarea cuplului la 50 A și 600 rpm

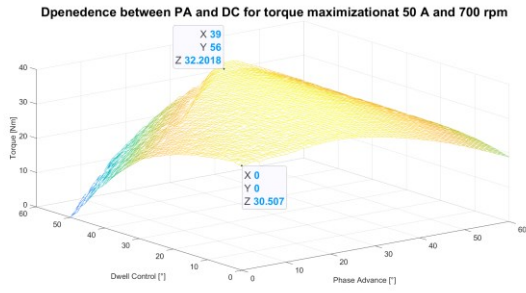


Fig. V-25. Dependența dintre unghiurile PA și DC pentru maximizarea cuplului la 50 A și 700 rpm

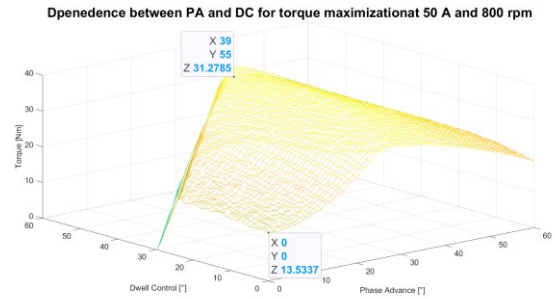


Fig. V-26. Dependența dintre unghiurile PA și DC pentru maximizarea cuplului la 50 A și 800 rpm

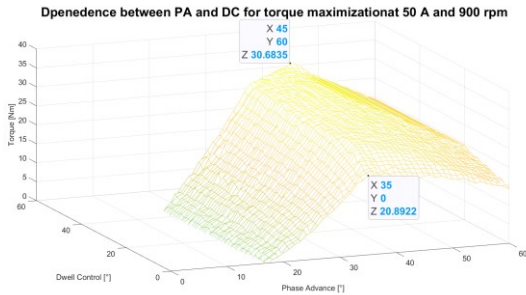


Fig. V-27. Dependența dintre unghiurile PA și DC pentru maximizarea cuplului la 50 A și 900 rpm

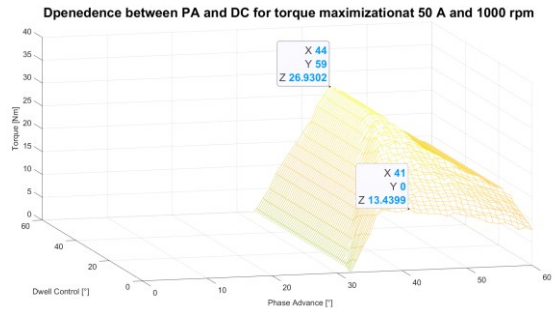


Fig. V-28. Dependența dintre unghiurile PA și DC pentru maximizarea cuplului la 50 A și 1000 rpm

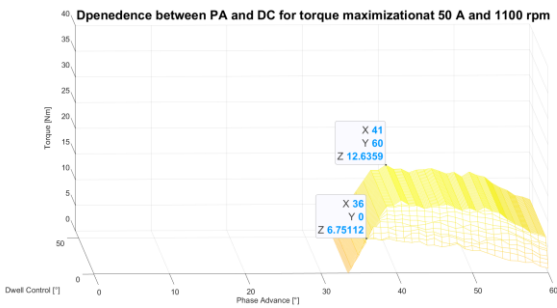


Fig. V-29. Dependența dintre unghiurile PA și DC pentru maximizarea cuplului la 50 A și 1100 rpm

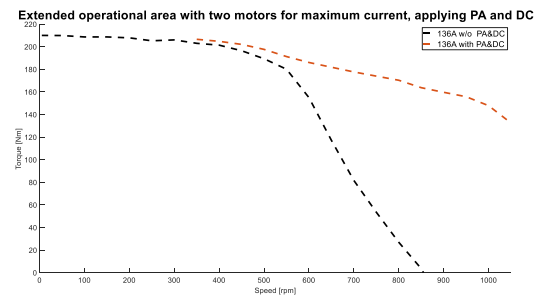


Fig. V-30. Arie operațională extinsă la 136 A cu PA și DC

Tabelul V-2. Perechi de unghiuri PA-DC pentru extinderea zonei operaționale a sistemului de propulsie

Turație [rpm]	300	350	400	450	500	550	600	650	700	750	800	850	900	950	1000
Unghi PA [°]	15	15	20	20	30	55	40	45	55	60	55	55	60	60	60
Unghi DC [°]	5	5	10	0	10	55	40	40	50	55	45	45	50	45	30

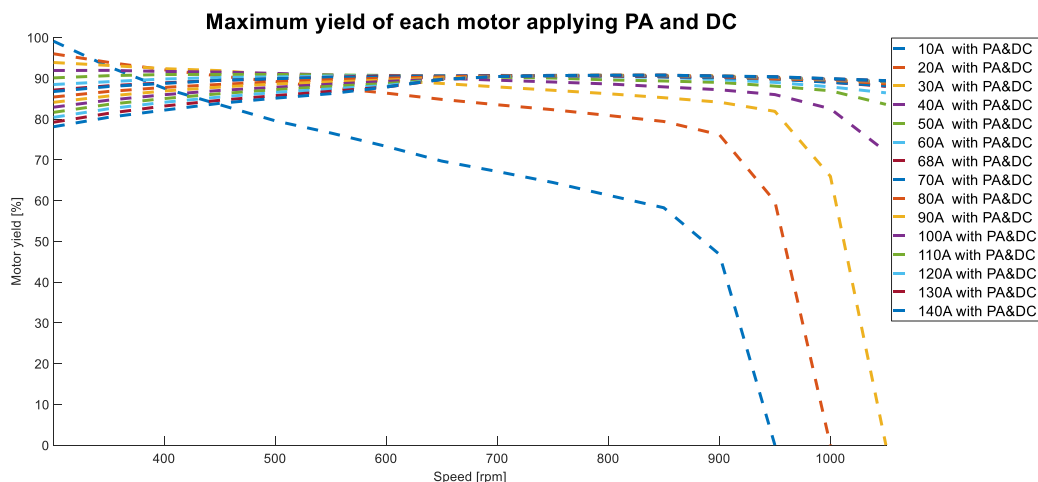
Maximizarea randamentului / eficienței

Fig. V-31. Randament maxim pentru motor utilizând metodele PA și DC

Tabelul V-3. Perechi de unghiuri PA-DC pentru a optimiza randamentul motorului at 70 A

Turație [rpm]	300	350	400	450	500	550	600	650	700	750	800	850	900	950	1000
Unghi PA [°]	10	10	5	10	35	30	25	30	35	30	35	45	45	50	50
Unghi DC [°]	0	0	0	0	45	30	20	35	40	35	40	55	55	60	40

V.4. Pa și DC pentru îmbunătățirea eficienței energetice într-un sistem de propulsie cu motoare BLDC**V.4.1. Date de intrare pentru investigație**

Tabelul V-4. Caracteristicile vehiculului pentru îmbunătățirea eficienței cu PA și DC

Caracteristica	Valoare	Unitate de măsură
Masa maximă	250	kg
Raza roții	0.275	m
Coeficientul de rezistență aerodinamică	0.46	-
Suprafața frontală	0.95	m ²
Raport de transmisie de la motor la roată	1	-

Tabelul V-5. Coeficienți de forțe rezistente pentru îmbunătățirea eficienței cu PA și DC

Caracteristica	Valoare	Unitate de măsură
Aderență	0.8	-
Rezistență la rulare	0.013	-

Tabelul V-6. Caracteristicile motoarelor pentru îmbunătățirea eficienței cu PA și DC

Caracteristica	Valoare	Unitate de măsură
Putere nominală	3	kW
Putere maximă	5,4	kW

Tensiune nominală	72	V
Număr de perechi de poli	16	-
Curent nominal	68	A
Turație nominală	650 rpm	Rpm
turație de mers în gol	860 rpm	Rpm
Rezistența electrică a fazei	0,027	Ω
Inductanța fazei	0,15	mH

A Un ciclu de testare, WLTC (Fig. II-3) este de asemenea utilizat în acest caz pentru a verifica capacitățile vehiculului.

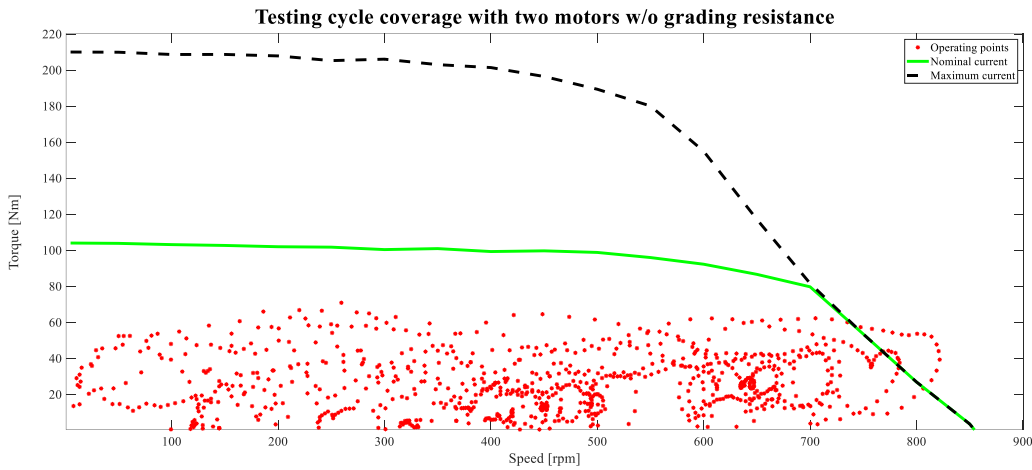


Fig. V-32. Zona operațională a sistemului de propulsie și punctele de operare solicitate fără pantă

V.4.2. Îmbunătățirea eficienței energetice în fiecare punct de operare

Implementarea platformei de test

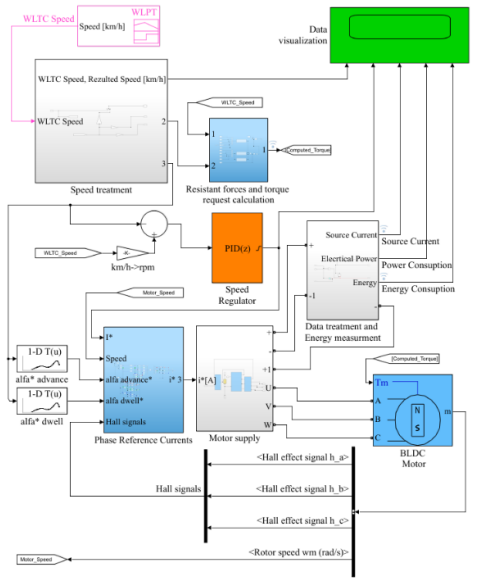


Fig. V-33. Model cu PM BLDC controlat în cuplu și regulator de viteză PID, pentru confirmarea îmbunătățirilor

Calculul unghiurilor PA și DC pentru eficiență maximă

Modelul construit în Fig. IV-5 este utilizat pentru prezenta investigație cu scopul de a extinde acoperirea zonei operaționale a grupului motopropulsor.

Tabelul V-7. Unghiuri PA și DC pentru eficiență maximă a fiecărui motor

Turație [rpm]	300	350	400	450	500	550	600	650
Unghi PA [°]	10	10	5	10	35	30	25	30
Unghi DC [°]	0	0	0	0	45	30	20	35

Turație [rpm]	700	750	800	850	900	950	1000
Unghi PA [°]	35	30	35	45	45	50	50
Unghi DC [°]	40	35	40	55	55	60	40

V.4.3. Rezultate

Rezultate obținute fără aplicarea metodelor PA și DC

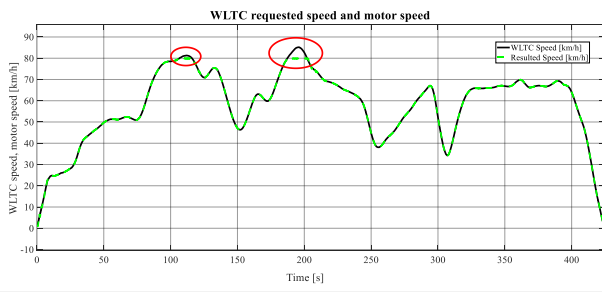


Fig. V-34. Viteza solicitată (cu negru) și viteza obținută (cu verde) fără PA și DC (control clasic)

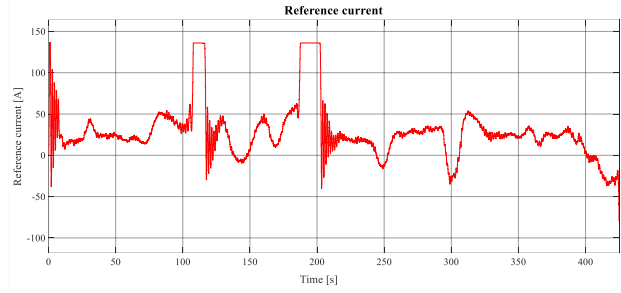


Fig. V-35. Curentul de referință generat de regulator fără PA și DC (control clasic)

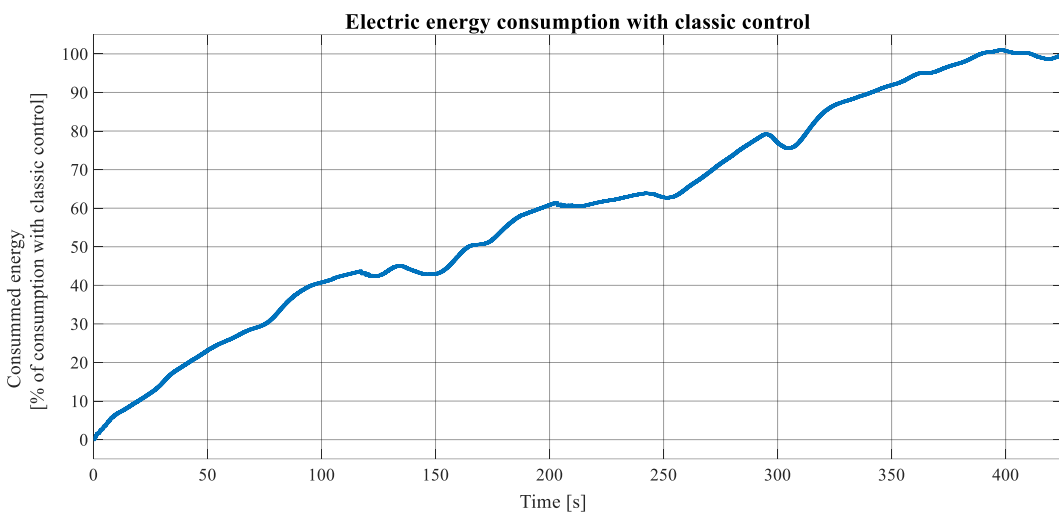


Fig. V-36. Consum de energie fără PA și DC (control clasic)

Rezultate obținute cu aplicarea metodelor PA și DC

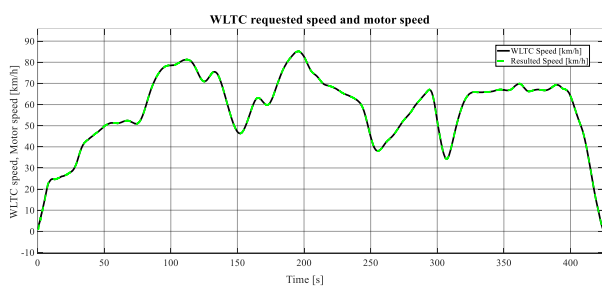


Fig. V-37. Viteza solicitată (cu negru) și viteza obținută (cu verde) cu PA și DC

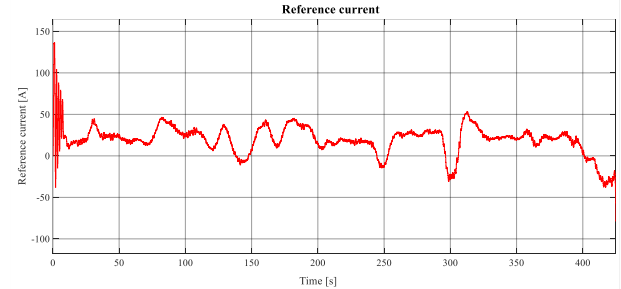


Fig. V-38. Curentul de referință generat de regulator cu PA și DC

Cantitatea de energie electrică consumată aplicând metodele PA și DC este mai mică, atingând **82,05 %** din energia totală consumată utilizând controlul clasic (fără PA și DC). Ecartul de viteză obținut este de aproximativ $5 \cdot 10^{-2}$ km/h.

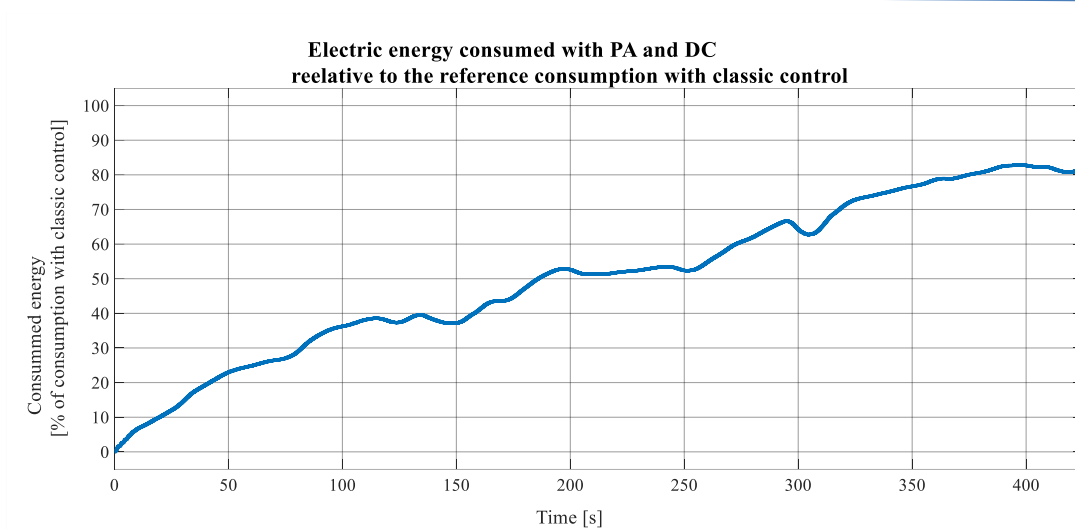


Fig. V-39. Consumul de energie cu PA și DC

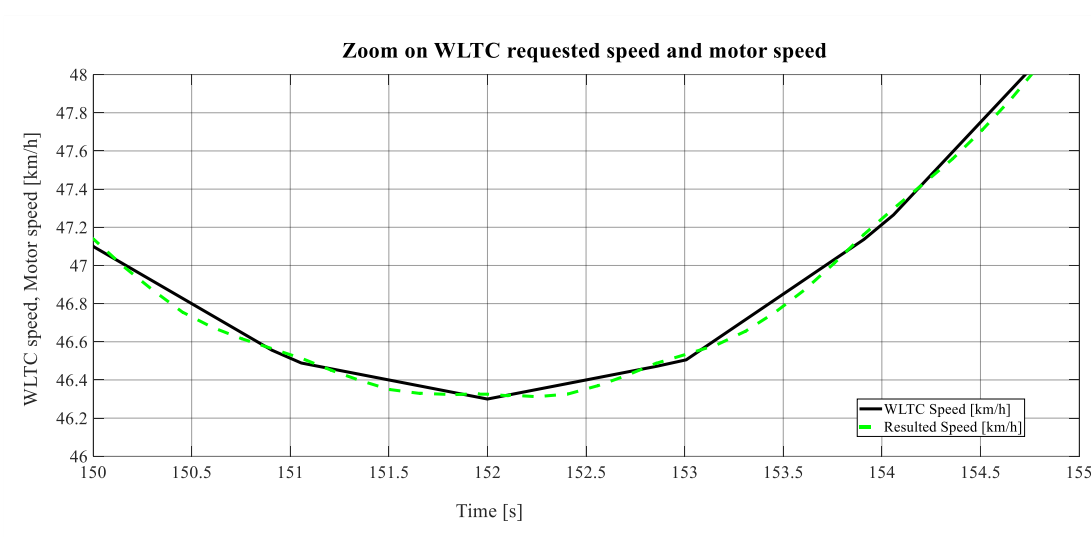


Fig. V-40. Ajustarea vitezei cu PA și DC

V.5. Concluzii

Aplicarea PA la deschiderea curentului de fază are în general un efect negativ pentru regiunile cu viteză mică. Pentru viteze mari, metoda permite crearea unui cuplu mai mare, folosind cu succes perioada în care back EMF crește de la zero la valoarea sa maximă. Comutația între faze, cu PA, generează și fluctuații de cuplu. Completarea PA cu DC, permite curentului inițial să continue să scadă atunci când cealaltă fază începe să funcționeze în paralel. Întreruperea curentului inițial se realizează atunci când nivelul curentului este mai scăzut, iar ondulațiile de cuplu scad. Perechea de unghiuri PA-DC pentru un anumit curent de referință, la o anumită viteză, generează cuplul solicitat pentru a acoperi punctul de funcționare respectiv. Viteza maximă crește destul de interesant folosind PA (>2600 rpm). La această viteză, unghiul DC nu mai are influență suplimentară. Aplicarea metodelor PA și DC permite extinderea zonei operaționale a grupului motopropulsor, cu maximizarea cuplului, dar poate fi aplicată și pentru maximizarea eficienței fiecărui motor din grupul motopropulsor. Perechi de unghiuri PA-DC pentru un curent de referință specificat au fost determinate pentru a maximiza randamentul motorului. În cele din urmă, a fost posibil să se confirme că aplicarea unor unghiuri PA-DC adecvate în regiunea de mare viteză poate genera rezultate pozitive pentru performanța grupului de propulsie și reduce consumul de energie.

VI. ANALIZA DE METODE DE REALIZARE A HĂRȚILOR DE EFICIENȚĂ PENTRU MOTOARE CU MAGNEȚI PERMANENȚI. IMPACTUL MOTOARELOR ADIȚIONALE, SIMILARE, ASUPRA GRUPULUI MOTOPROPULSOR AL VE. COMPLEMENTE PENTRU CAPITOLUL III

Motorul BLDC din Tabelul IV-1 este studiat din punctul de vedere al realizării hărților de eficiență, comparând calculul analitic și simularea, integrând experiența experimentală, verificând rezultatele distribuției optime de sarcină într-o configurație de grup motopropulsor cu trei motoare identice.

VI.1. Rezultatele calculului analitic

Pierderile totale

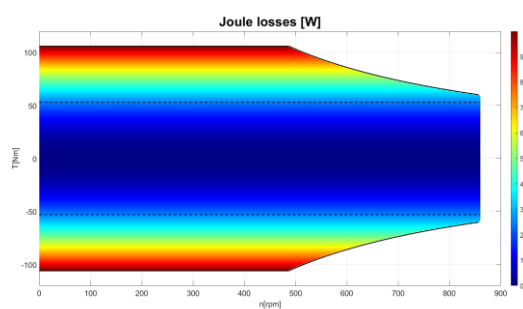


Fig. VI-1. Pierderi Joule – calcul analitic

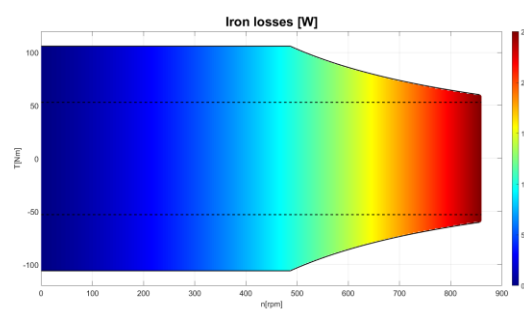


Fig. VI-2. Pierderi în fier – calcul analitic

Pierderile de fier reprezintă pierderile prin histerezis și curenți turbionari. Fig. VI-2 arată rezultatul obținut prin calcul analitic și interpolare (proces prezentat în Fig. III-8). Pierderile suplimentare ale motorului (pierderi anormale din cauze diferite) sunt neglijate. Pierderile totale în motor rezultă ca suma pierderilor în Joule și a pierderilor de fier.

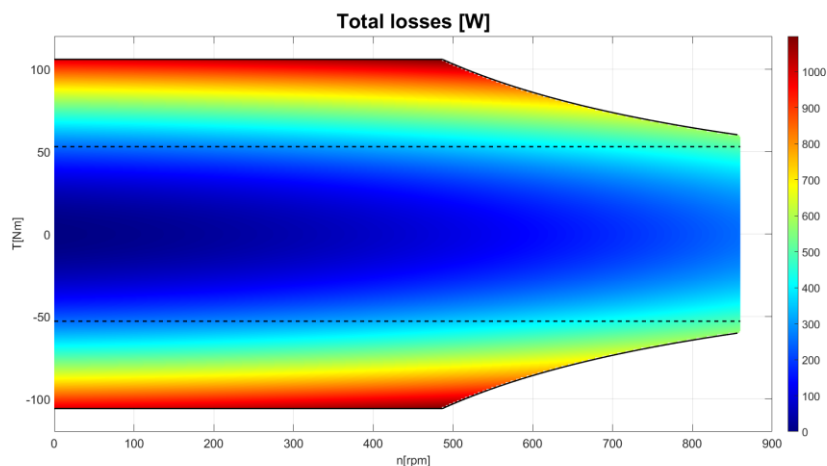


Fig. VI-3. Pierderi totale – calcul analitic

Fig. VI-3.

Puterea generată (putere mecanică) și puterea absorbită (putere electrică)

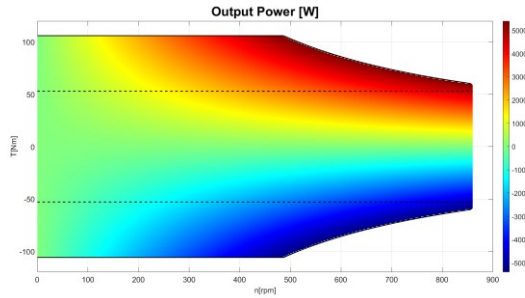


Fig. VI-4. Puterea generată – calcul analitic

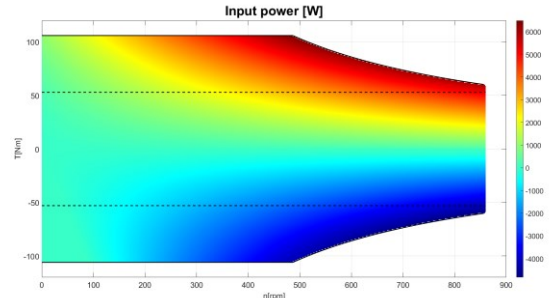


Fig. VI-5. Puterea absorbită – calcul analitic

Hărți de eficiență

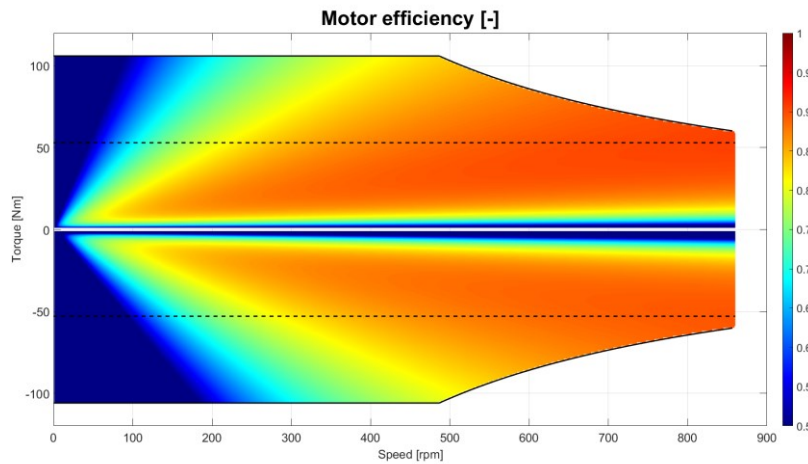


Fig. VI-6. Harta de randament a motorului –calcul analitic

VI.2. Realizarea hărților de eficiență prin simulare și tratarea datelor

Modelul MATLAB-Simulink din Fig. IV-5 este utilizat pentru a investiga capacitățile motorului. În funcție de rapiditatea computerului și de timpul disponibil, în simulare sunt introduse perechi de curenți de referință și viteză pentru motor. Fig. VI-7 prezintă diagrama procesului de realizare.

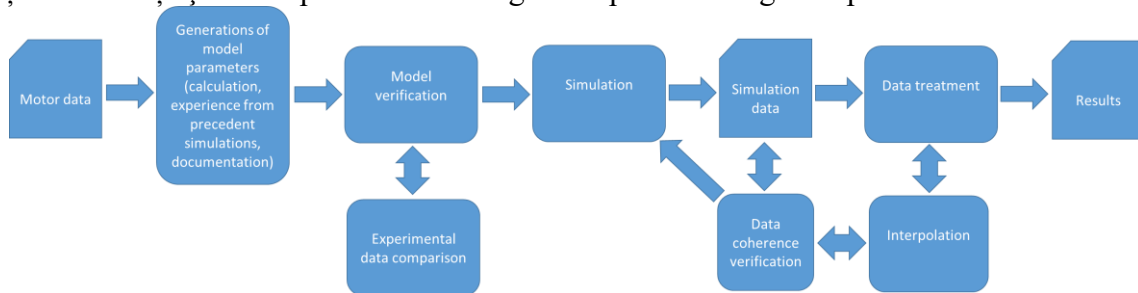


Fig. VI-7. Diagrama de proces pentru hărți de eficiență cu generare de date prin simulare și tratare a datelor

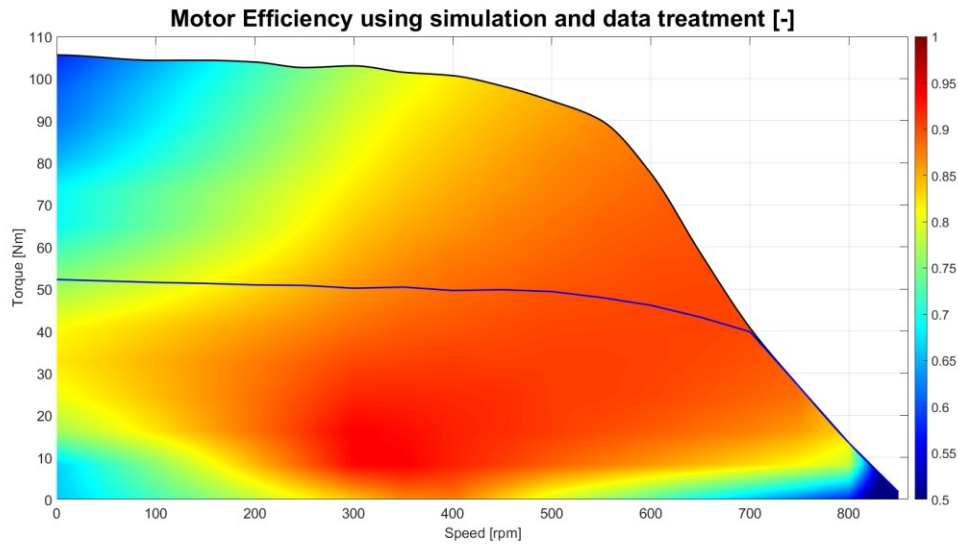


Fig. VI-8. Randamentul motorului prin simulare și tratare a datelor

Deoarece simularea integrează regimurile dinamice și fazele de tranziție ale mărimilor fizice în timpul măsurătorilor, acestea au nevoie de o perioadă de supraveghere în funcție de dinamismul tranzițiilor. În comparație cu hărțile de eficiență obținute prin calcul analitic, rezultatul din Fig. VI-8 devine mai natural și mai realist.

VI.3. Exemplu de constituire a grupului motopropulsor folosind datele obținute anterior

Un vehicul bazat pe informațiile din Tabelul V-4 și Tabelul V-5 este luat în considerare cu două modificări majore: masa vehiculului este crescută la 400 Kg, iar raza roții devine 0,3 m.

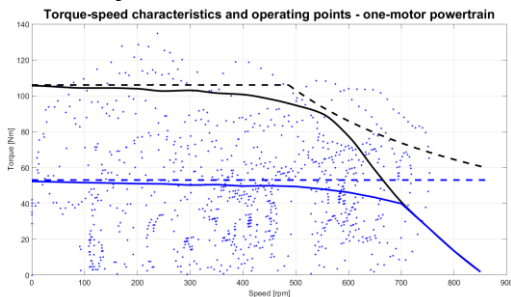


Fig. VI-9. Caracteristica cuplu-turație și punctele de operare cu un singur motor

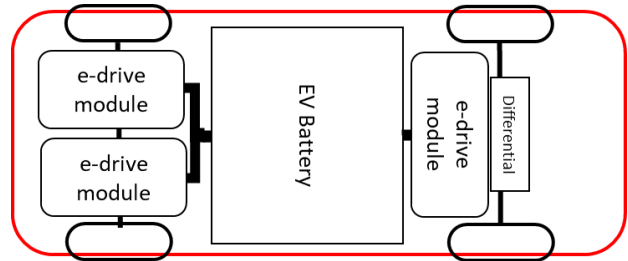


Fig. VI-10. Noua configurație de vehicul cu trei motoare

Din hărțile de eficiență obținute anterior prin simulare și tratarea datelor, ar fi necesare trei motoare identice pentru a acoperi cererea de cuplu în regiunea de mare viteză (între 1000 și 1500 de secunde ale WLTC). Investigația va consta în acoperirea a două cazuri de alocare statică a sarcinii: distribuția procentuală a sarcinii de 40% pe axa frontală și 60% pe axa spate (un motor va trebui să acopere 40% din cuplul solicitat și fiecare dintre celelalte două motoare 30%), și distribuția optimă a sarcinii (în cazul motoarelor identice, fiecare motor trebuie să acopere cererea de cuplu împărțită la numărul de motoare, 1/3 în acest caz). Rezultatele de eficiență energetică sunt sintetizate în următoarele două tabele.

Tabelul VI-1. Eficiența energetică pentru întregul WLTC

Coefficient de distribuție a sarcinii [%]	Randament Motor [%]	Randament grup motopropulsor [%]
---	---------------------	----------------------------------

30	80.2419	80.9109464
40	81.9357	
Distribuție optimă de sarcină	81.0003	81.0003

Tabelul VI-2. Eficiența energetică pentru zona de viteze mari a WLTC

Coeficient de distribuție a sarcinii [%]	Randament Motor [%]	Randament grup motopropulsor [%]
30	82.4279	83.2344458
40	84.4743	
Distribuție optimă de sarcină	83.2976	83.2976

VI.4. Concluzii

Pentru a susține alegerea mai multor motoare pentru un grup motopropulsor EV, cercetarea actuală a oferit o nouă metodologie pentru a realiza hărțile de randament pentru un anumit motor PM BLDC. Pe baza acestora, a fost investigat un grup motopropulsor cu trei motoare pentru eficiența energetică. **Alocarea statică de sarcină cu o distribuție procentuală a cuplului total solicitat (60% pe puntea spate cu două motoare identice și 40% pe puntea frontală cu un singur motor), oferă rezultate bune față de repartizarea optimă a sarcinii între motoare. Diferența de rezultat este mai mică de 0,09% pentru întregul ciclu de testare și mai mică de 0,07% doar pentru viteză mare.**

VII. PREGĂTIREA DEZVOLTĂRIILOR EXPERIMENTALE

VII.1.1. Investigații cu motoare sincrone cu magneți permanenți (PMSM)

Fig. VII-1 prezintă modelul MATLAB-Simulink utilizat pentru motoarele PMSM.

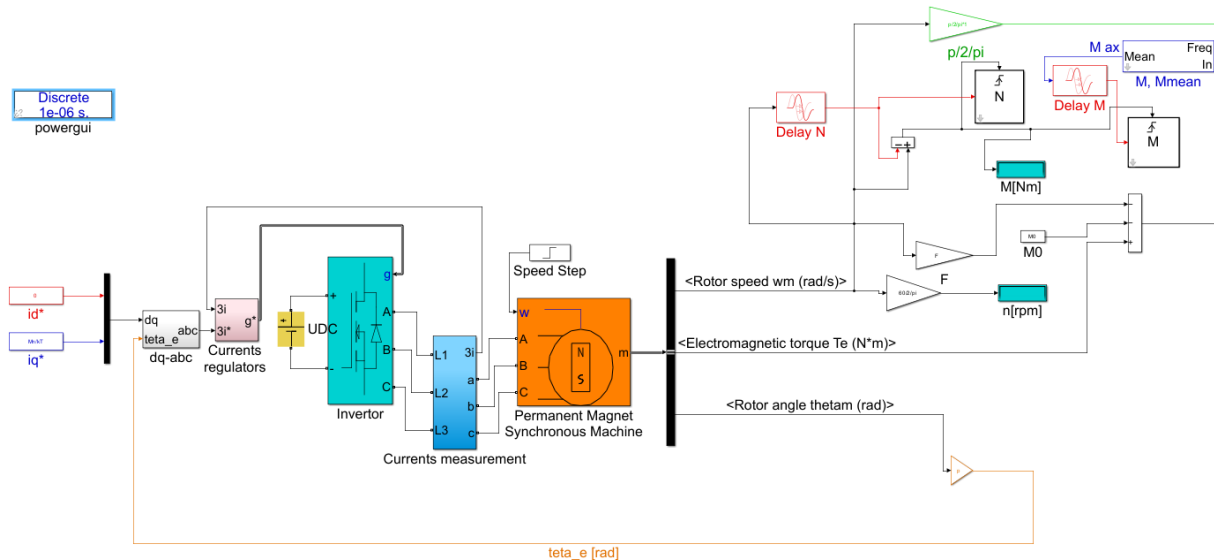


Fig. VII-1. Model Simulink dezvoltat pentru investigațiile PMSM

VII.2. Pregătirea pentru platformele fizice

VII.2.1. Surse de tensiune electrică

Fig. VII-2 prezintă o vedere schematică a surselor DC implementate pentru platformele fizice.

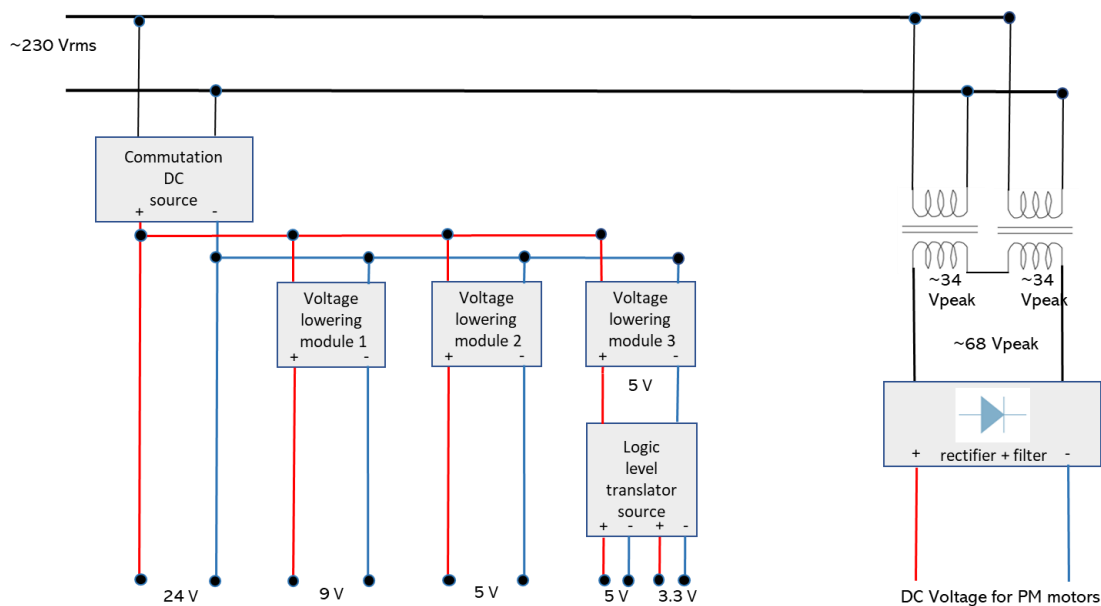


Fig. VII-2. Surse de curent continuu (DC) pentru alimentarea platformelor

VII.3. Producerea de cuplu rezistent

Pentru a produce un cuplu rezistent în timpul investigațiilor motoarelor, un generator electric de curent continuu (DC) a fost investigat și integrat într-una dintre platformele fizice. Înainte de orice utilizare a generatorului, acesta a fost verificat din punct de vedere mecanic și electric.



Fig. VII-3. Generatorul de curent continuu după renovare și integrare pe platforma fizică

Următoarea familie de curbe a fost determinată în ceea ce privește posibilul cuplu rezistent.

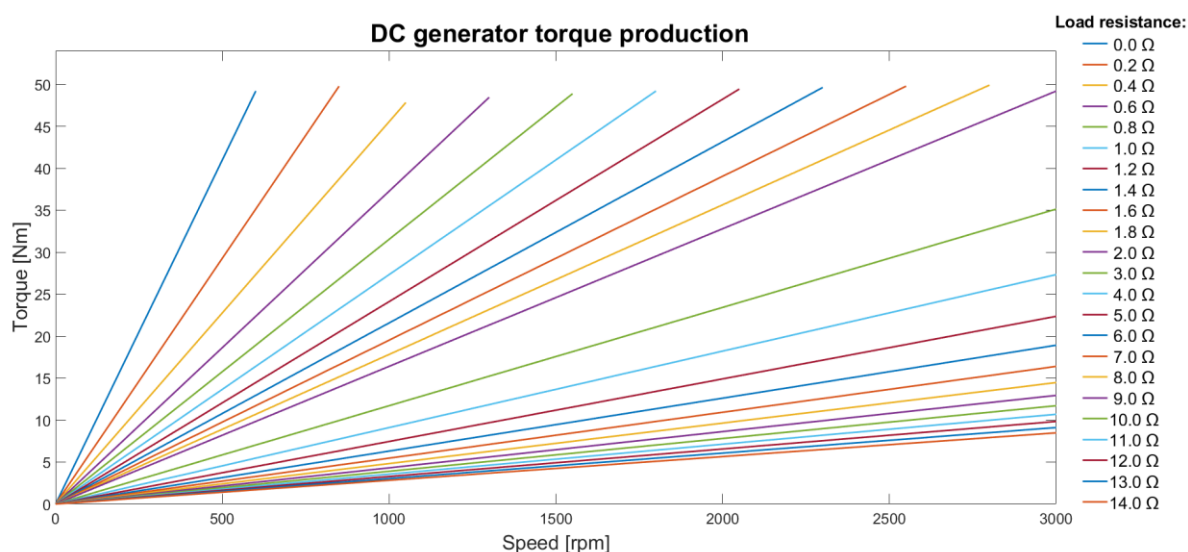


Fig. VII-4. Cuplu rezistent produs de generatorul de curent continuu

VII.4. Concluzii

Ca și în cercetările precedente, simularea a fost folosită înainte de orice test fizic. Un sistem de alimentare a fost conceput pentru a oferi tensiuni continue de 3,3 V, 5 V, 9 V și 24 V pentru sistemele electronice de control și măsurare. Un transformator clasic urmat de un redresor și un filtru a fost folosit pentru a asigura alimentarea motoarelor PM. Dezvoltând și rulând modelul corespunzător MATLAB-Simulink, au fost determinați parametrii redresorului și filtrului. Rezultatele fizice le-au confirmat pe cele simulate. Dezvoltările viitoare integrează o sursă de alimentare cu comutație. Pentru a crea forțe rezistente, ca la un vehicul real, un generator de curent continuu a fost investigat și este integrat pe una dintre platformele fizice. De asemenea, s-a obținut un set de curbe care dă producția de cuplu rezistent a generatorului.

VIII. DEZVOLTAREA PLATFORMELOR FIZICE ȘI MĂSURĂTORI

VIII.1. Dezvoltarea platformelor fizice

VIII.1.1. Platformă cu un motor independent



Fig. VIII-1. Platformă fizică integrând un singur motor

VIII.1.2. Platformă cu două motoare rulând la aceeași viteză



Fig. VIII-2. Platformă cu două motoare în roată – imagine asupra cuplajului dintre roți

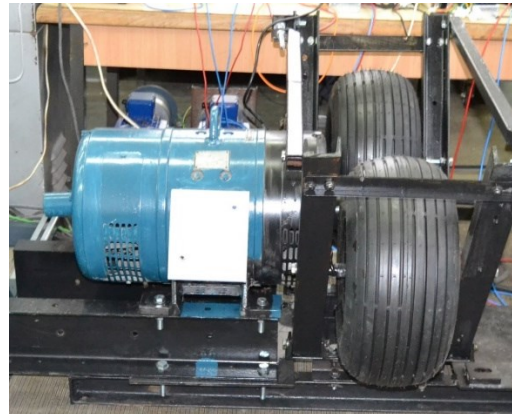


Fig. VIII-3. Platformă cu două motoare în roată – situație finală

VIII.1.3. Platformă cu două motoare independente

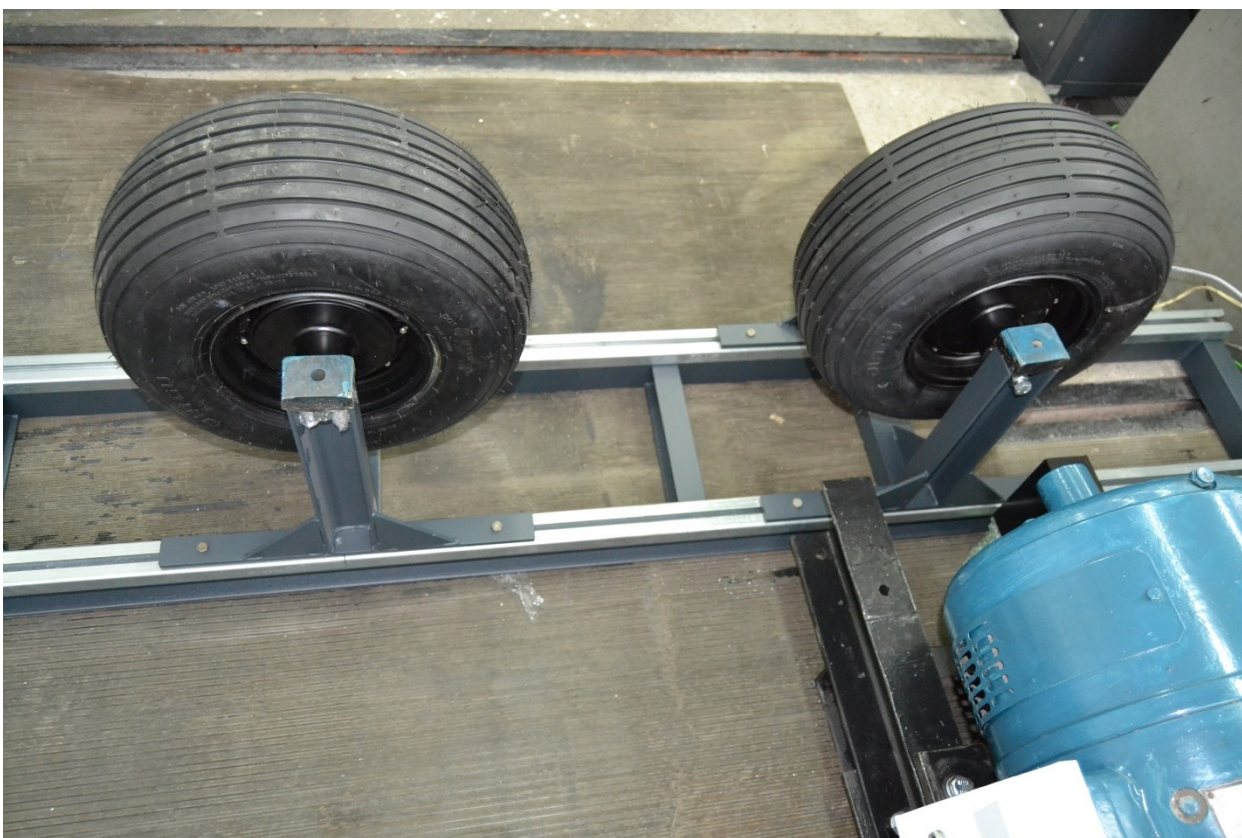


Fig. VIII-4. Platformă cu două motoare în roată, independente – situația finală

VIII.1.4. Controlul platformelor implementat cu microcontroler STM32

Era nevoie de integrarea unui microcontroler cu posibilități suficiente de I/O pentru a supraveghea cel puțin două motoare pe o singură platformă.

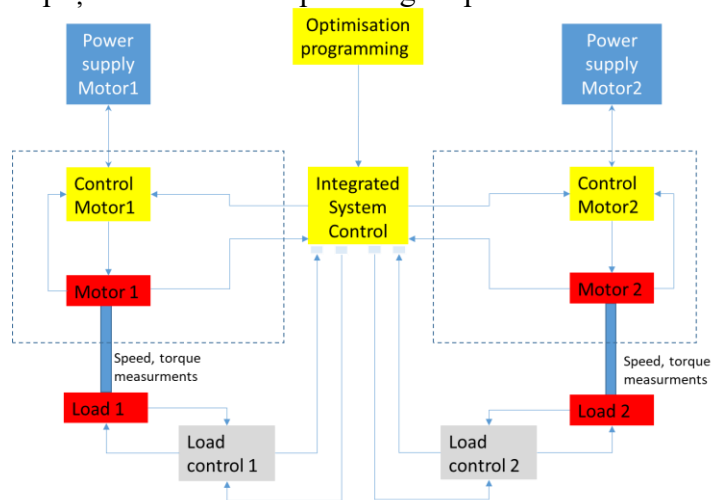


Fig. VIII-5. Vedere generală asupra sistemului de management al platformelor

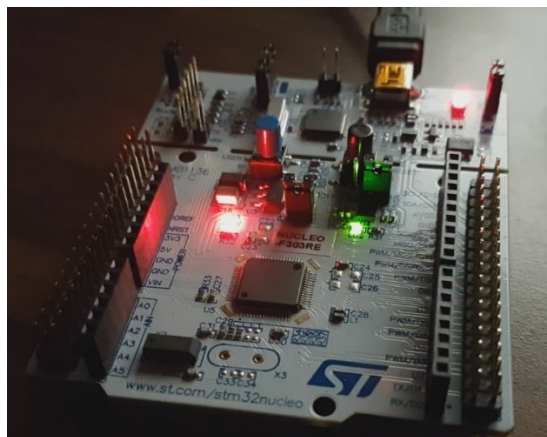


Fig. VIII-6. Microcontroler STM32 F303RE

Implementarea profilului de viteză, Măsurarea vitezei, Controlul vitezei

Cercetările privind motoarele PM explicate anterior au condus în mod regulat la aplicarea unui ciclul de testare standardizat, WLTC sau FTP75.

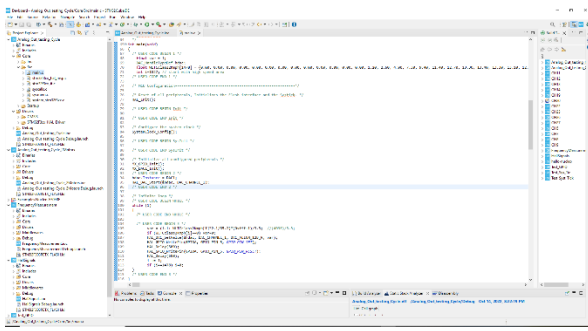


Fig. VIII-7. Rutina principală pentru crearea unui profilului de viteză tip WLTC

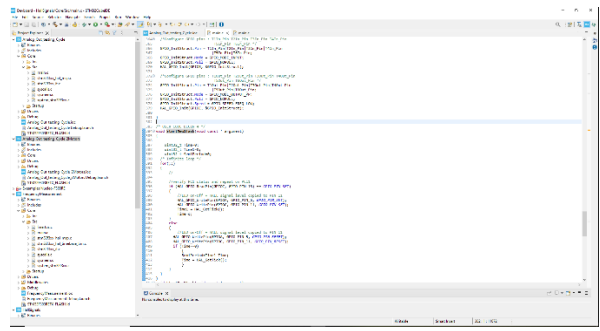


Fig. VIII-8. Rutină pentru măsurarea perioadei semnalului Hall

VIII.2. Determinări fizice

VIII.2.1. Măsurări experimentale



Fig. VIII-9. Funcționarea motorului PM ca generator pentru primele determinări



Fig. VIII-10. Motor PM – măsurarea rezistenței de fază și a inductanțelor

VIII.2.2. Constituirea convertorului electro-mecanic de curent continuu (DCEMC)

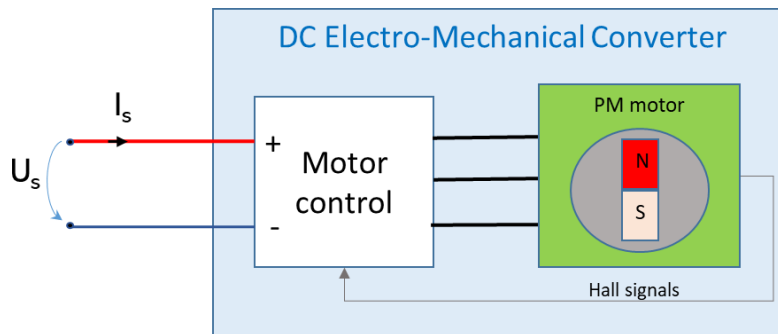


Fig. VIII-11. Văzând controlul motorului și motorul PM ca un DCEMC

VIII.2.3. Determinarea zonei de operare a motoarelor

Următoarele determinări se referă la motoarele PM achiziționate și instalate pe platformele descrise anterior. Combinând simularea, după modelul prezentat în Fig. VII-1, și măsurătorile fizice, a fost posibilă obținerea unor rezultate mai precise.

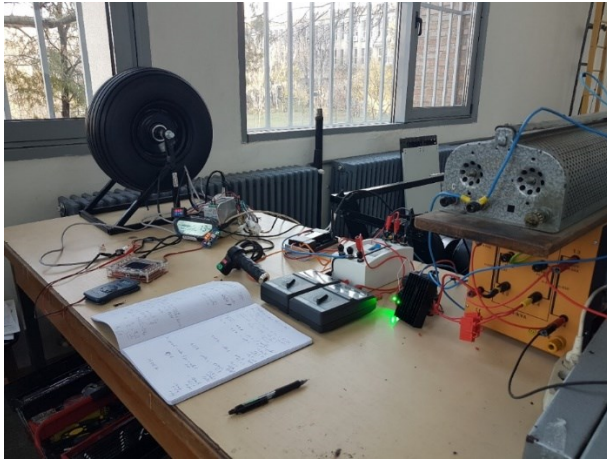


Fig. VIII-12. Măsurători fizice – vedere generală asupra studiului la mers în gol

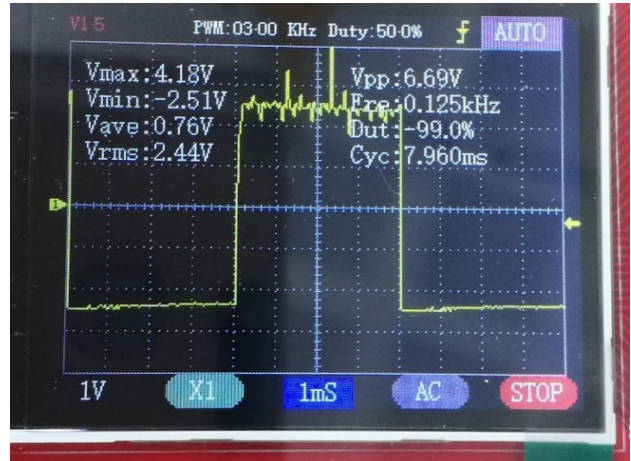


Fig. VIII-13. Semnal Hall pe osciloscop la o viteză a vehiculului de 32 km/h

Viteza măsurată pe dispozitivul de bord a dat o valoare orientativă. Valoarea mai precisă a fost calculată pe baza măsurării perioadei semnalelor Hall. Determinarea coeficienților pierderilor de putere, T_{f_0} și F_v , au presupus mai multe măsurători în condiții de gol și sarcină la viteze diferite. S-a căutat consistența între rezultate la selectarea valorilor adecvate. Cei doi coeficienți au rezultat din valorile reținute: $T_{f_0}=0,986$ Nm și $F_v=0,005$ Nms. Datele comerciale ale motoarelor achiziționate, prezintă o viteză maximă teoretică $v_{n_{\max}} = 50$ km/h, fără limită de timp de rulare, acceptată de vehiculul cu sistem de propulsie cu un singur motor, pentru o tensiune nominală de 60 V. Înseamnă că motorul poate funcționa continuu la viteza unghiulară corespunzătoare și căldura internă dezvoltată poate fi evacuată continuu. A doua informație disponibilă a fost puterea maximă $P_{out_{\max}} = 1500$ W. Motorul poate furniza această putere o perioadă limitată de timp (secunde). Pentru raza roții $r_w = 0,225$ m, fără raport de transmisie între roată și motor (motor în roată) rezultă viteza unghiulară nominală maximă, 61,37 rad/s. Deci, turația teoretică maximă este 589,78 rpm. Pentru platforma din Fig. VIII-2, unde raportul de transmisie între motorul electric și generator este 1:2,3, pentru rotorul generatorului de curent continuu rezultă o viteză maximă de 1356,5 rot/min. Pentru un vehicul cu masa $M_{veh} = 200$ kg, rulând pe beton cu un coeficient de rezistență la înaintare $c_r = 0,013$, cu o suprafață frontală $S_{veh} = 0,95$ m², și un coeficient de rezistență aerodinamică $c_x = 0,46$, forța de rezistență totală este $F_{total} = 77,138$ N și corespunde la un cuplu $T_{n_{\max}} = 17,356$ Nm. Astfel se confirmă că platforma fizică cu două motoare cuplate poate furniza prin intermediul generatorului de curent continuu suficient cuplu rezistent pentru ambele motoare. Puterea maximă de ieșire de 1500 W la viteza maximă de 50 km/h, corespunde unui cuplu maxim de 24,3 Nm. Prin acționarea motorului în mod generator fără sarcină și măsurarea tensiunii la borne se obține constanta back EMF $k_E = 1,14$ V_{peak}·s/rad. Constanta de cuplu obținută este $k_T = 0,99$ Nm/A_{peak}. Neglijând pierderile rezultă valorile efective maxime pentru curentul care trece prin motor pentru viteza nominală maximă (fără limită de timp) și pentru puterea maximă (timp limitat), 12,34 A și respectiv 17,28 A. Astfel se confirmă că platforma fizică cu două motoare cuplate poate fi alimentată cu energie electrică din sursa DC special dezvoltată pentru motoare. Datele obținute anterior sunt procesate sub MATLAB pentru a genera o reprezentare grafică în figura următoare.

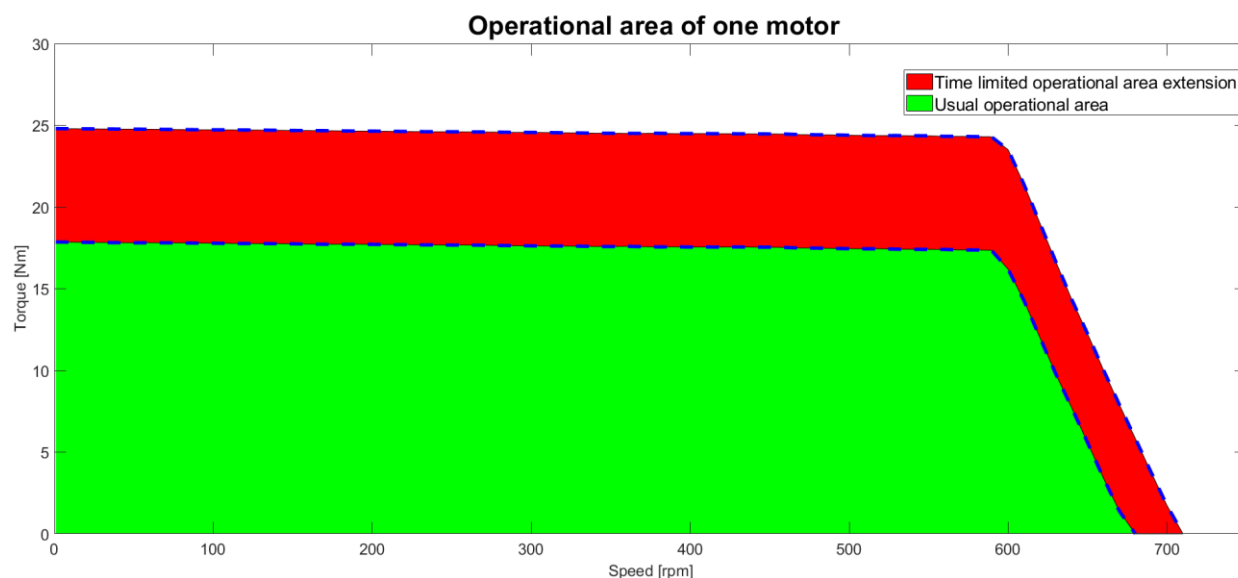


Fig. VIII-14. Zona operațională a motorului investigat

VIII.3. Concluzii

Lucrarea propriu-zisă a pus accentul pe informațiile complementare necesare și activități care să facă posibilă cercetarea și să ajute la confirmarea rezultatelor. Concepția de platforme fizice, surse de tensiune complementare, instrumente de măsurare și dispozitive de control dedicate sunt exemple de activități consumatoare de timp. Există satisfacție când acestea vin să susțină cercetarea. Pe de altă parte, cunoștințele complementare obținute oferă perspective pentru studii și dezvoltări viitoare. Exemplul DCEMC este concludent deoarece energia electrică stocată la bord în bateria electrică oferă direct o sursă de tensiune DC. Este nevoie de a o transforma și adapta pentru o performanță mai bună. În zilele noastre, instrumentele de simulare care ating un anumit nivel de încredere sunt din ce în ce mai folosite pentru a obține o imagine a unei realități viitoare. Cu toate acestea, este nevoie de o reglare fină a parametrilor de simulare pentru a obține rezultate mai realiste. Zona operațională a motoarelor a fost construită pe baza informațiilor disponibile despre motoare, simulări și măsurători fizice.

IX. CONCLUZII GENERALE ȘI OPORTUNITĂȚI VIITOARE DE CERCETARE

Strategia de optimizare a consumului de energie, fiind un subiect complex și multidomeniu, începutul cercetării s-a concentrat pe construirea pas cu pas a obiectivului principal. Au fost stabilite obiective secundare suplimentare pentru atingerea celui principal.

În capitolul II sunt prezentate fazele de pregătire legate de simulare. Componentele principale ale simulării vehiculului reprezintă primele rezultate ale acestei lucrări. Ulterior, se realizează transformarea cererii de viteză normalizată în forță de tracțiune care urmează să fie dezvoltată de grupul motopropulsor pornind de la caracteristicile principale ale vehiculului și ale drumului. S-a construit și s-a explicat metodologia de obținere a punctelor de operare corespunzătoare. Două motoare BLDC diferite sunt utilizate pentru a continua cercetarea prin construirea și implementarea procesului pentru studiul zonei operaționale prin calcul analitic folosind programarea și obținerea caracteristicilor motorului. În final, se analizează acoperirea punctelor de operare de către fiecare motor.

Capitolul III construiește metode specifice de alocare a sarcinii: statice, dinamice și mixte. În cadrul fiecărei metode sunt definite și analizate criteriile de distribuție (urmărind impactul asupra eficienței): distribuții complementare, procentuale, proporționale și optime pentru metoda statică, distribuții de sarcină bazate pe situații trecute și viitoare, distribuția de minimizare a pierderilor interne pentru metoda dinamică, și extinderea capacităților vehiculului folosind metoda mixtă. Este prezentată metoda de calcul a coeficienților pierderilor în fier în funcție de turația motorului și turația la pătrat a motorului. Pe parcursul întregului ciclu de testare, grupul motopropulsor studiat cu un singur motor consumă cu aproximativ 10% mai multă energie decât grupul motopropulsor cu două motoare într-o alocare complementară a sarcinii. De asemenea, aplicarea repartizării complementare a sarcinii începând cu un motor, sau altul, nu este lipsită de importanță și poate duce la un impact pozitiv suplimentar asupra consumului de energie (aproximativ 1%). În ceea ce privește distribuția sarcinii folosind un procent fix, alocarea proporțională a sarcinii dă satisfacție deoarece motoarele sunt încărcate proporțional cu capacitățile lor și nu există niciun risc de supraîncărcare a unui motor. Distribuția optimă a sarcinii este obținută din modelul analitic, urmărind maximizarea eficienței grupului de propulsie. În ipotezele metodei, s-a obținut coeficientul optim de distribuție a sarcinii pentru fiecare motor al grupului motopropulsor ca valoare constantă pentru întreaga zonă de operare. Procesul de determinare a hărților de eficiență/rendament pentru un motor și pentru grupul motopropulsor, prin calcul analitic este apoi construit și prezentat. Comparând hărțile de eficiență rezultate, distribuția optimă a sarcinii a generat cea mai bună eficiență a grupului de propulsie. Continuând investigarea metodelor de alocare a sarcinii, cea dinamică a fost definită printr-un calcul specific de distribuție a sarcinii în fiecare punct de operare. Rezultatele minimizării pierderilor interne pentru fiecare punct de operare sunt comparate cu o distribuție statică a sarcinii între motoare. Îmbunătățiri de 0,2% pe o suprafață plană și 3,4% pentru o pantă de 15 grade, sunt generate în comparație cu alocarea procentuală a sarcinii de 40%-60% pentru grupul motopropulsor bimotor. Metoda de distribuție mixtă a sarcinii este utilizată pentru a sublinia diferența dintre distribuția optimă (cu extinderea prin alocare dinamică a sarcinii) și cazul grupului motopropulsor cu un singur motor. S-a studiat o extindere a utilizării vehiculului până la limitele superioare ale motoarelor electrice. Capitolul III se încheie prin prezentarea unei noi metode de explorare a limitelor vehiculului pornind de la caracteristicile grupului motopropulsor.

Metode avansate de îmbunătățire a caracteristicilor motoarelor și a performanței vehiculului au fost studiate folosind sistemul de propulsie BLDC în capitolul IV. Modelul simulat al motorului permite introducerea a două metode de îmbunătățire a caracteristicilor motorului: Phase Advance (PA) și Dwell Control (DC). Simularea este utilizată pentru a obține caracteristicile motorului. A fost dezvoltat un model dedicat utilizând parametrii motoarelor, un profil de viteză dedicat pentru investigarea zonei operaționale, calculul forțelor de rezistență pentru vehicul și, în final, furnizarea punctelor de operare. O schemă de implementare specifică este dezvoltată și prezentată pentru metodele PA și DC. Este construit modelul matematic pentru PA și DC. Acesta generează un model specific dezvoltat în simulare.

Odată implementată simularea, capitolul V este dedicat efectuării investigațiilor și furnizării rezultatelor. A fost analizată întreaga zonă operațională pentru vehiculul simulat în capitolul IV. În ceea ce privește grupul motopropulsor, zona operațională a acestuia este construită printr-o nouă metodă folosind simularea pentru curentul nominal și respectiv maxim suportat de motoare și pentru unghiuri PA de la 0 la 60 de grade (considerate ca fiind extreme). Zona operațională a motorului poate fi mărită utilizând PA pentru viteze mari, iar viteza în gol obținută este de 2662,85 rpm (de trei ori mai mult decât viteza maximă a unui motor fără PA). Metoda aplicată confirmă o îmbunătățire a curentului motorului la viteze mari cu PA, în paralel cu o creștere a ondulațiilor cuplului. În plus, metoda DC a fost aplicată în paralel cu PA. Îmbunătățirea obținută constă în reducerea ondulațiilor de cuplu, reducerea cuplului la turații mici și creșterea cuplului la viteze mari. Creșterea unghiului DC afectează mai mult forma curentului, deplasându-l către unul sinusoidal. Apropiindu-se de viteza

maximă fără sarcină obținută utilizând PA, pe măsură ce forma curentului este din ce în ce mai sinusoidală, efectul unghiului DC se reduce. Metoda de generare a dependenței cuplului grupului motopropulsor de unghiurile PA și DC a fost prezentată cu exemple grafice 3D. În cele din urmă, se adaugă un complement la modelul de simulare pentru a obține perechile de unghiuri respective, crescând eficiența grupului de propulsie în fiecare punct de operare. A fost dezvoltat un model suplimentar pentru a măsura impactul asupra consumului de energie. Pentru vehiculul investigat, aplicarea metodei a dat o reducere de aproximativ 18% a acestuia pentru un ciclu WLTC. Ca o concluzie generală, folosind PA și DC, grupul motopropulsor BLDC, pentru un anumit vehicul, este capabil să funcționeze mai bine în ceea ce privește producția de cuplu, viteza și eficiența.

Noi metodologii de realizare a hărților de eficiență/rendament ale motoarelor și de alegere a numărului de motoare dintr-un grup motopropulsor EV sunt dezvoltate în Capitolul VI. Pentru un vehicul cu trei motoare BLDC identice, distribuția optimă a sarcinii dă cele mai bune rezultate, dar alocarea statică a sarcinii cu o distribuție procentuală a cuplului total solicitat cu 60 % pe puntea spate cu două motoare identice și 40 % pe puntea față cu un singur motor, oferă și aceste rezultate bune. Diferența de rezultat este mai mică de 0,09% pentru întregul ciclu de testare și mai mică de 0,07% pentru regiunea de mare viteză.

Pentru experimente fizice și măsurători (capitolul VII), a fost necesară construirea unei surse de alimentare pentru controlul platformelor de testare și măsurarea mărimilor fizice. Au fost dezvoltate surse de alimentare suplimentare pentru motoarele PM folosind simulare înainte de alegerea componentelor fizice. Pentru producția de cuplu rezistent, un generator de curent continuu a fost măsurat și investigat realizând dependența cuplului de viteză și încărcarea generatorului. Capitolul VIII continuă pregătirea experimentelor completând aspectele fizice prin dezvoltarea a trei platforme fizice pentru motoarele PM: un motor independent, două motoare care funcționează la aceeași viteză cuplate la aceeași sarcină, și două motoare independente. Pentru investigații, supravegherea platformelor este realizată de un microcontroler STM32 cu programe specifice lansate pentru implementarea profilului de viteză, măsurarea vitezei și controlul acesteia. Există, de asemenea, introducerea unui nou concept: DCEMC – DC Electro-Mechanical Convertor. Cu ajutorul măsurătorilor fizice se obține aria operațională a motoarelor achiziționate pentru platformă.

Procesele, metodele și platformele fizice dezvoltate și prezentate anterior deschid căi pentru cercetări ulterioare bazate pe motoarele PM, combinând metodele de alocare a sarcinii (capitolul III, capitolul VI), optimizări la nivel de motor individual (capitolul IV, capitolul V), realizarea de grupuri propulsoare multimotoare (capitolul II, capitolul VI). Platformele fizice ajută la confirmarea parametrilor de simulare. Ele sprijină evoluțiile viitoare legate de sistemele de propulsie multimotoare, cum ar fi controlul specific al cuplului și al vitezei pentru motoarele care propulsează individual o roată a vehiculului, sub constrângerea stabilității vehiculului, atunci când se caută îmbunătățiri energetice.

CONTRIBUȚII ORIGINALE

Cercetarea a fost efectuată folosind motoare cu magneți permanenți (PM) prin programare software, dezvoltarea de modele și simulare, și verificarea datelor experimentale pe platforme dedicate. Principalele realizări sunt enumerate mai jos.

1. Reducerea consumului de energie electrică pentru un vehicul electric (EV) care utilizează sisteme de propulsie cu mai multe motoare:

- cercetare privind utilizarea a două motoare (mai mici) în loc de un singur motor echivalent (mai mare) pentru optimizarea consumului de energie,
- realizarea diferitelor strategii de alocare a sarcinii între motoarele grupului de propulsie (strategii de alocare statice, dinamice și mixte),
- studii privind impactul alocărilor de sarcină asupra hărților de eficiență/rendament rezultate pentru grupul motopropulsor,
- investigații privind alocarea statică a sarcinii statice: distribuții complementare, procentuale, proporționale și optime, și metodologie pentru calcularea unei distribuții optime a sarcinii pornind de la caracteristicile motorului;
- investigații privind minimizarea pierderilor interne ale grupului motopropulsor,
- studiul unui grup motopropulsor cu două motoare de același tip, dar cu caracteristici diferite pentru extinderea zonei operaționale folosind alocarea mixtă de sarcină;
- construirea curbelor limită pentru un grup motopropulsor în funcție de masa totală vehiculului și unghiul de pantă.

2. Aplicarea metodelor Phase Advance (PA) și Dwell Control (DC) pentru:

- creșterea vitezei maxime a sistemului de propulsie,
- maximizarea cuplului produs de grupul motopropulsor,
- optimizarea eficienței grupului motopropulsor,
- studiul influenței unghiurilor PA și DC asupra caracteristicilor precedente ale grupului motopropulsor,
- maximizarea randamentului motorului,
- reducerea consumului de energie al VE folosind grupul motopropulsor respectiv.

3. Elaborarea metodologiei pentru hărți de eficiență/rendament a motoarelor electrice:

- o metodologie bazată pe calcul analitic, simulare și tratare a datelor,
- aplicarea rezultatului în constituirea grupurilor motopropulsoare multimotoare (trei motoare),
- analiza impactului configurației vehiculului asupra eficienței energetice pentru a apropia rezultatele unei distribuții procentuale de sarcină de cele ale unei distribuții optime.

4. Realizarea de platforme experimentale multimotor:

- investigații fizice asupra motoarelor PM în roți,
- investigații fizice folosind motoare independente,
- investigații fizice folosind motoare care funcționează la aceeași viteză,
- implementarea unui sistem de control și monitorizare,
- instalarea echipamentelor suplimentare necesare.

PUBLICAȚII ALE AUTORULUI

I. Cărți

Ca1. C.L. Popescu, N. Vasiliu, M. Ivănescu, *Cercetarea și dezvoltarea de sisteme și soluții pentru mobilitate durabilă*, Ed. Politehnica Press, București, 104 p. ISBN 978-606-515-633-3 2015

II. Articole publicate / studii extinse în reviste

Ris Reviste ISI / indexate BDI / reviste internaționale

Ris1. L. Popescu, L. Melcescu, L. Dumitran, A. Crăciunescu, A. Stănescu, "Control Analysis of a Bi-motor Electric Traction System for Energy and Performance Optimization", accepted for AIP Conference Proceedings at *International Conference on Communications, Information, Electronic and Energy Systems - CIEES 2021*, November 25 – 27, 2021, AIP Conference Proceedings 2570, 040002 (2022); <https://doi.org/10.1063/5.0099663> Published Online: 18 August 2022

Index: The Conference Proceedings Citation Index (part of Web of Science), Scopus (Elsevier), Inspec, Chemical Abstracts Service (CAS), Astrophysics Data System (ADS)).

Index: SCOPUS AUTH. ID:57238783500

Ris2. C.L. Popescu, L. Dumitran, A. Stănescu " Simulation of Multi-Motor Propulsion System for Energy Efficiency in Electric Vehicles" in *Annals of the University of Craiova, Electrical Engineering series*, No. 45, Issue 1, 2021, published the 21st of January 2022; pp 75-82; ISSN 1842-4805, DOI: 10.52846/AUCEE.2021.1.11

<https://elth.ucv.ro/fisiere/anale/wp-content/uploads/2022/01/11-2021.pdf>,

<https://doi.org/10.52846/aucee.2021.1.11>, Index: Copernicus, Cat. B+ Journal CNCSIS

Ris3. O. Craiu, I. Ichim, **L. Popescu**, " FEM Study of a Brushless Synchronous Motor with different Permanent Magnet Topologies, 2022 - Scientific Bulletin of University Politehnica of Bucharest, Series C Electrical Engineering and Computer Science, ISSN 2286-3540

https://www.scientificbulletin.upb.ro/rev_docs_arhiva/reze02_229821.pdf

Index; ISI Thomson Reuters, INSPEC, SCOPUS, ELSEVIER SCIENCES BIBLIOGRAPHIC DATABASES, Metadex, ENGINEERING VILLAGE, CAMBRIDGE SCIENTIFIC ABSTRACTS, ENGINEERED MATERIALS ABSTRACTS, Cat. B+ Journal CNCSIS, Web of Science Core Collection: Emerging Sources Citation Index, Index: SCOPUS AUTH. ID:57238783500

Ris4. C.L. Popescu, "RTR's involvement in continuous improvement of quality and reliability of Renault Group's vehicles", in *Fuel Economy, Safety and Reliability of Motor Vehicles (ESFA 2009)*, Bucharest, Romania, 2009, Publisher SIAR,

<https://go.fisita.com/store/papers/ESFA09/E09C104>

Rns. Reviste Naționale, CNCSIS

Rns1. L. POPESCU, A. Stănescu, "Efficiency maps for an EV BLDC motor using analytic calculation and simulation", in *Electric machines, materials and drives present and trends (SME 2022)*, APME, vol. 18, nr. 1, pp. 89-99, March. 2023, retrieved from <https://journal.iem.pub.ro/apme/article/view/352>, ISSN / ISSN-L: 1843-5912

Rns2. L. Popescu, A. Stănescu, Șt. Vasiliu, "Didactical platform for multi-motor solutions", in *Electric machines, materials and drives present and trends (SME 2021)*, APME, vol. 17, nr. 1, pp. 172–181, ian. 2022, retrieved from <https://journal.iem.pub.ro/apme/article/view/131>

ISSN / ISSN-L: 1843-5912, <https://www.doi.org/10.36801/apme.2021.1.17>

Rns3. L. Popescu, "Electromobility topics entering a new decade", in *Electric machines, materials and drives present and trends (SME 2020)*, APME, vol. 16, nr. 1, pp. 131–140, ian. 2021, retrieved from <https://journal.iem.pub.ro/apme/article/view/209>, ISSN / ISSN-L: 1843-5912, <https://www.doi.org/10.36801/apme.2020.1.13>

Rns4. C.L. Popescu "RTR's involvement in continuous improvement of quality and reliability of Renault Group's vehicles" in *Ingineria Automobilului*, nb. 14 , pp. 4-8, / March 2010, ISSN 1842 – 4074, http://siar.ro/wp-content/uploads/2014/02/RIA_14.pdf

Index: Web of Science - Emerging Source Citation Index (ESCI)

III. Conferințe – articole publicate / studii extinse / proceedings

Vis. Conferințe internaționale

Vis.1 L. Popescu, O. Craiu and L. Melcescu, "Analyzing the Torque Transfer between Two In-Wheel Motors of an Electric Vehicle," 2023 13th International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering (ATEE), Bucharest, Romania, 2023, pp. 1-6, doi: 10.1109/ATEE58038.2023.10108365.

Index: IEEE Xplore, Clarivate (WOS) and SCOPUS listed conferences

<https://ieeexplore.ieee.org/document/10108365>

WOS: ongoing, Index: SCOPUS ongoing

Vis.2 O. Craiu, T. -I. Ichim and L. C. Popescu, "3D FEM Model of a Hybrid Stepper Using Scalar-Vector Potential Formulations," 2023 13th International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering (ATEE), Bucharest, Romania, 2023, pp. 1-5, doi: 10.1109/ATEE58038.2023.10108283.

Index: IEEE Xplore, Clarivate (WOS) and SCOPUS listed conferences, <https://ieeexplore.ieee.org/document/10108283>, WOS: ongoing, Index: SCOPUS ongoing

Vis.3 L. Popescu, L. Melcescu and O. Craiu, "Energy Efficiency Improvement for an Electric Vehicle PM BLDC Propulsion System Using Phase Advance and Dwell Control," 2022 International Conference on Electrical, Computer, Communications and Mechatronics Engineering (ICECCME), 2022, pp. 1-6, doi: 10.1109/ICECCME55909.2022.9988388.

<https://ieeexplore.ieee.org/document/9988388>, INSPEC: 22474858, Index: SCOPUS AUTH.

ID:57238783500

Vis.4 L. Popescu, L. Melcescu, O. Craiu, A. Craciunescu and V. Bostan, "Phase Advance and Dwell Control Applied to a PM BLDC Motor for Increasing the Maximum Speed of an Electric Vehicle," 2022 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM), 2022, pp. 850-855, doi: 10.1109/SPEEDAM53979.2022.9841974.

<https://ieeexplore.ieee.org/document/9841974>, INSPEC: 21930188, Index: SCOPUS AUTH.

ID:57238783500

Vis.5 O. Craiu, T. I. Ichim, L. M. Melcescu and L. Popescu, "Optimization of a High Torque Density Small Hybrid Stepper using 3D FEM Model," 2022 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM), 2022, pp. 610-615, doi: 10.1109/SPEEDAM53979.2022.9842105.

INSPEC: 21930247, <https://ieeexplore.ieee.org/document/9842105>, Index: SCOPUS AUTH.

ID:57238783500

Vis.6 L. Popescu, L. Melcescu, L. Dumitran, A. Crăciunescu, A. Stănescu, "Control Analysis of a Bi-motor Electric Traction System for Energy and Performance Optimization", accepted for AIP Conference Proceedings at International Conference on Communications, Information, Electronic and Energy Systems - CIEES 2021, November 25 – 27, 2021

https://www.youtube.com/watch?v=wSWsFHot9nU&list=PLFXbUXJmS8n_xzwDQQD0wBaqJTk8YWeF9&index=3

Vis.7. L. Popescu, L. Melcescu, L. Dumitran, and A. Crăciunescu, " Analysis of the influence of wheel torque distribution on energy efficiency in the case of an electric vehicle with two motors" [abstract], in Proceeding book of 1st International Conference on Applied Engineering and Natural Sciences (ICAENS), 1-3 November 2021, Konya, Turkey pp. 300

<https://drive.google.com/file/d/1ZYtf6Db11JezKksVtqHqBKID-Mv9BtxU/view?usp=sharing>

Vis.8. L. Popescu, L. Dumitran and A. Stanescu, "Multi-motor solutions for electric vehicles," 2021 International Conference on Applied and Theoretical Electricity (ICATE), 2021, pp. 1-6, doi: 10.1109/ICATE49685.2021.9465016,

IMSPEC: 20895693, WOS:000709089900039, Index: SCOPUS AUTH. ID:57238783500

Vis9. Marinescu D.G., Nicolae V., **Popescu C.L.**, Calin L., Mierloiu N., Andreescu C., Clenci A. (eds) (2016) DUSTER ZERO—Electric Vehicle Research 4WD. In: Proceedings of the European Automotive Congress EAEC-ESFA 2015. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-27276-4_4

Vis10. Marinescu, D., **C.L. Popescu**, Ion Tabacu, V. Nicolae, Florin Serban, Ș. Tabacu, I. Vieru and Iorga Adrian. “EVS 28 KINTEX , Korea , May 3-6 , 2015 A Full Electric Vehicle 4 WD Type.” (2015)

Index: SCOPUS AUTH. ID:57238783500

Vis11. **C.L. Popescu**, "RTR's involvement in continuous improvement of quality and reliability of Renault Group's vehicles", Presented at: Fuel Economy, Safety and Reliability of Motor Vehicles (ESFA 2009), November 2009, organized by SIAR, Bucharest, Romania

Vn. National conference volumes

Vn1. **L. Popescu**, A. Stănescu, " Efficiency maps for an EV BLDC motor using analytic calculation and simulation" in *Electric machines, materials and drives present and trends* symposium, XVIII edition (SME 2022), Bucharest, the 9th of December 2022, published in IEM journal

Vn2. **L. Popescu**, A. Stănescu, Șt. Vasiliu, "Didactical platform for multi-motor solutions", in *Electric machines, materials and drives present and trends* symposium, XVII edition (SME 2021), Bucharest, 19th of November 2021, published in IEM journal

Vn3. **L. Popescu**, "Electromobility topics entering a new decade", in *Electric machines, materials and drives present and trends* symposium, XVI edition (SME 2020), Bucharest, 20th of November 2020, published in IEM journal

IV. Articole acceptate / trimise pentru viitoare publicări – reviste internaționale / Conferințe

Ris4. **L. Popescu**, O. Craiu, "Energy Consumption Analysis for an EV Powertrain using Three BLDC Identical Motors", for Rev. Roum. Sci. Techn.– Électrotechn. et Énerg Vol. xx, y, pp. uuu–zzz, Bucarest, 2023.

Index Clarivate Analytics (ex Thomson Reuters) JCR impact factor (2021/2022): 0.670, Web of Science Core Collection: Science Citation Index Expanded, Additional Web of Science Indexes: Essential Science Indicators, Revue Roumaine des Sciences Techniques, Série Électrotechnique et Énergétique is a journal of the Romanian Academy, the Engineering Section

Ris5. O. Craiu, I. Ichim, **L. Popescu**, " Analyzing a Three-Hundred Teeth bi-phase Hybrid Stepper Motor with different Numbers of Pole-pairs ", for Rev. Roum. Sci. Techn.– Électrotechn. et Énerg Vol. xx, y, pp. uuu–zzz, Bucarest, 2023.

Index Clarivate Analytics (ex Thomson Reuters) JCR impact factor (2021/2022): 0.670, Web of Science Core Collection: Science Citation Index Expanded, Additional Web of Science Indexes: Essential Science Indicators. Revue Roumaine des Sciences Techniques, Série Électrotechnique et Énergétique is a journal of the Romanian Academy, the Engineering Section

Vis12. **L. Popescu**, A. Crăciunescu, O. Craiu, " Analysis of the Wheel Steering Influence on Energy Consumption of an EV PMSM In-wheel Propulsion System", for *Interdisciplinarity in Engineering* (INTER-ENG 2023, the 16th edition)

The Proceedings of the 15th edition of the International Conference on Interdisciplinarity in Engineering has been indexed by Clarivate Analytics Conference Proceedings Citation Index-Science (CPCI-S) in Web of Science Core Collection (ISI Web of Science)