Universitatea Națională de Științe și Tehnologie
POLITEHNICA București
CENTRUL UNIVERSITAR PITEȘTI

Școala doctorală „INGINERIA AUTOVEHICULELOR”

Rezumat :

CONTRIBUȚII PRIVIND SOLUȚII DE OPTIMIZARE A CONSUMULUI DE ENERGIE LA AUTOVEHICULELE RUTIERE

TEZĂ DE DOCTORAT

Conducător științific:
prof. univ. dr. habil. ing. **Ștefan-Lucian TABACU**

Doctorand:
ing. **Elena-Daniela OLARIU**

PITEȘTI 2026

CUPRINS REZUMAT

INTRODUCERE ***5***

Capitolul 1: ANALIZA ȘI CLASIFICAREA MULTIDIMENSIONALĂ A SISTEMELOR MODERNE DE PROPULSIE PENTRU AUTOVEHICULE RUTIERE ***6***

1.1. Evoluția principiilor de conversie energetică 6

1.2. Clasificarea multidimensională a sistemelor de propulsie 7

1.2.1. Clasificarea după natura sursei primare de energie 7

1.2.2. Clasificarea după mecanismul de conversie energetică 7

1.2.3. Clasificarea după arhitectura cinematică 7

1.2.4. Clasificarea după gradul de electrificare 8

1.2.5. Clasificarea după performanța energetică globală 8

1.3. Configurații principale ale sistemelor de propulsie 8

1.4. Sinteză privind performanța energetică a arhitecturilor de propulsie 9

Capitolul 2: ANALIZA ARHITECTURII FUNCȚIONALE ȘI A SUBSISTEMELOR DE PROPULSIE ALE AUTOVEHICULULUI ELECTRIC CU BATERII ***9***

2.1. Sistemul de stocare a energiei 9

2.2. Sistemul de management al bateriei 10

2.3. Sistemul de conversie a puterii 10

2.4. Motorul electric de tracțiune 10

2.4.1. Motorul asincron 10

2.4.2. Motorul sincron cu magneți permanenți 10

2.4.3. Configurații hibride PMSM - ASM în autovehiculele electrice moderne 11

2.4.4. Motorul sincron cu excitație electromagnetică 11

2.4.5. Motoarele sincrone de reluctanță și variantele asistate cu magneți permanenți 12

2.4.6. Caracteristica mecanică a motoarelor de tracțiune 12

2.4.7. Strategii de optimizare și control ale motoarelor de tracțiune 12

2.4.8 Funcționarea motorului de tracțiune în regim generator. Frânarea regenerativă 12

2.4.9. Managementul termic al unității integrate de acționare 13

2.4.10. Topologii constructive emergente ale motoarelor de tracțiune 13

2.5. Transmisia mecanică 13

Capitolul 3: MODELAREA DINAMICII LONGITUDINALE A AUTOVEHICULELOR ***13***

3.1. Definirea condițiilor de autopropulsare 13

3.2 Ecuația generală de mișcare longitudinală 14

3.3. Modelul energetic asociat dinamicii longitudinale 14

Capitolul 4: INDICATORI DE PERFORMANȚĂ ENERGETICĂ AI AUTOVEHICULELOR ELECTRICE ***14***

4.1. Indicatori energetici globali 14

4.2 Indicatori electrici și electrochimici 15

4.3. Indicatori electromecanici și funcționali 15

4.4. Indicatori termici 15

Capitolul 5: FACTORII DETERMINANȚI AI CONSUMULUI ENERGETIC AL AUTOVEHICULELOR ELECTRICE CU BATERIE ***15***

5.1. Clasificarea factorilor de influență asupra consumului energetic 15

5.2. Factori constructivi ai autovehiculului 15

5.3. Factori comportamentali și operaționali 15

5.4. Factori de mediu și infrastructură rutieră 16

5.5. Factori asociați degradării și stării sistemului de stocare 16

5.6. Sinteza influenței factorilor asupra consumului energetic 16

Capitolul 6:ANALIZA NUMERICĂ PARAMETRICĂ A CONSUMULUI ENERGETIC AL AUTOVEHICULULUI ELECTRIC ***16***

6.1. Analiza efectului masei echivalente asupra consumului energetic al unui BEV 16

6.2. Analiza influenței masei autovehiculului și a presiunii în pneuri asupra consumului asociat rezistenței la rulare 17

6.3. Analiza influenței accelerației asupra cererii de putere și a limitării prin aderență 17

6.4. Analiza contribuției sistemului HVAC asupra consumului energetic 18

6.5. Analiza influenței stilului de conducere asupra consumului energetic 19

Capitolul 7: METODOLOGIE DE OBȚINERE A HĂRȚII DE EFICIENȚĂ PENTRU UN MOTOR ELECTRIC DE TRACȚIUNE DESTINAT AUTOVEHICULELOR ELECTRICE ***20***

Capitolul 8: CERCETĂRI PRIVIND INFLUENȚA ARHITECTURII SISTEMULUI DE PROPULSIE ASUPRA CONSUMULUI ENERGETIC ***21***
8.1. Influența poziționării motorului electric în arhitectura sistemului de propulsie asupra consumului energetic 21
8.2. Analiza influenței arhitecturii motorului electric asupra consumului energetic al autovehiculului electric 25
8.3. Concluzii integrate privind influența arhitecturii sistemului de propulsie asupra consumului energetic 31
Capitolul 9: CERCETĂRI PRIVIND EVALUAREA INFLUENȚEI MANAGEMENTULUI TERMIC ASUPRA PERFORMANȚEI ENERGETICE ȘI AUTONOMIEI AUTOVEHICULELOR ELECTRICE ***31***
9.1. Surse de pierderi energetice dependente de temperatură în sistemele de propulsie ale autovehiculelor electrice . 31
9.2. Strategii integrate de optimizare a managementului termic pentru sistemele de propulsie BEV 31
9.2.1. Control predictiv termic (TMPC) 32
9.2.2. Recuperarea activă a căldurii reziduale 32
9.2.3. Controlul la viteză variabilă a sistemului de răcire 32
9.2.4. Distribuția termică inteligentă 32
9.2.5. Optimizarea sistemului HVAC și precondiționarea termică 32
9.3. Analiza profilurilor termice tranzitorii rezultate din strategiile de management termic 32
9.3.2. Analiza distribuției pierderilor și a fluxurilor termice 34
9.4. Analiza impactului strategiilor de optimizare asupra consumului de energie 35
CONCLUZII FINALE ***37***
Contribuții originale ale tezei 39
Direcții viitoare de cercetare 40
Referințe bibliografice ***41***

INTRODUCERE

Dezvoltarea sistemelor moderne de propulsie pentru autovehiculele rutiere se desfășoară, în prezent, într-un context global dominat de necesitatea reducerii consumului energetic și a impactului asupra mediului [1],[2],[3]. Având în vedere că sectorul transporturilor se numără printre principalii generatori de emisii de gaze cu efect de seră, tranziția către soluții de mobilitate sustenabilă a devenit o direcție strategică esențială la nivel european și mondial [4],[5]. În aceste condiții, electrificarea sistemelor de propulsie depășește statutul unei simple alternative tehnologice, reprezentând o schimbare fundamentală în modul de producere, conversie, utilizare și gestionare a energiei la nivelul autovehiculului [6],[7].

În același timp, contextul energetic actual, marcat de volatilitatea pieței combustibililor fosili și de presiunile generate de limitarea resurselor convenționale, accentuate în ultimii ani, inclusiv în perspectiva crizei energetice din 2026, evidențiază necesitatea unor soluții de tranziție eficiente [8],[9]. În acest sens, autovehiculele cu propulsie electrică parțială sau completă reprezintă o etapă esențială, oferind posibilitatea reducerii consumului de combustibili fosili prin integrarea energiei electrice provenite inclusiv din surse regenerabile [5]. Utilizarea acestor surse, dintre care unele sunt practic inepuizabile, contribuie la diversificarea mixtului energetic și la creșterea securității energetice în sectorul transporturilor [4].

În cazul autovehiculelor electrice, consumul de energie nu poate fi analizat doar prin prisma componentelor individuale, ci trebuie privit ca rezultatul interacțiunii dintre subsistemele principale - sistemul de stocare a energiei, electronica de putere, motorul electric de tracțiune și sistemele auxiliare - precum și al condițiilor reale de exploatare [7],[10],[13]. Profilul de viteză, stilul de conducere și condițiile de mediu influențează în mod direct comportarea energetică, generând variații semnificative ale consumului de energie [14],[15].

În acest context, o problemă esențială a cercetării o reprezintă identificarea și cuantificarea factorilor care determină consumul energetic al autovehiculelor electrice. Aceștia pot fi grupați în trei categorii principale: factori constructivi, asociați parametrilor tehnici ai autovehiculului; factori operaționali, legați de condițiile de exploatare și factori comportamentali, dependenți de modul de utilizare. Interacțiunea dintre aceste categorii conduce la un comportament energetic complex, care nu poate fi surprins prin analize simplificate.

Pornind de la aceste considerente, **obiectivul general** al prezentei teze de doctorat îl constituie dezvoltarea unei analize integrate a consumului de energie al autovehiculelor electrice, bazată pe corelarea modelării dinamice a autovehiculului cu caracteristicile electromagnetice ale sistemului de propulsie și cu condițiile reale de exploatare, în vederea identificării și cuantificării factorilor determinanți și a evidențierii direcțiilor de optimizare a performanței energetice și a autonomiei.

În vederea atingerii acestui obiectiv general, sunt definite următoarele **obiective specifice**:

- realizarea unei analize a sistemelor moderne de propulsie pentru autovehicule rutiere, cu evidențierea particularităților arhitecturilor electrice și a avantajelor acestora din punct de vedere energetic;
- dezvoltarea modelului pentru studiul dinamicii longitudinale și a modelului energetic al autovehiculului electric, în vederea corelării profilului de viteză cu solicitările mecanice și energetice ale sistemului de propulsie;
- definirea și utilizarea indicatorilor de performanță energetică pentru evaluarea comportării sistemului în condiții reale de exploatare;
- analiza influenței factorilor determinanți asupra consumului energetic, incluzând parametrii constructivi, condițiile de exploatare și stilul de conducere;
- realizarea unei analize numerice privind influența masei, accelerației, presiunii în anvelope și a sistemelor auxiliare asupra consumului energetic;
- dezvoltarea unei metodologii de determinare a hărții de eficiență pentru motorul electric de tracțiune, bazată pe modelare electromagnetică;
- evaluarea influenței arhitecturii sistemului de propulsie asupra consumului energetic, atât pentru configurații hibride, cât și pentru autovehicule electrice;
- analiza influenței managementului termic asupra performanței energetice și autonomiei autovehiculului electric;
- identificarea direcțiilor de optimizare a consumului energetic, pe baza corelării rezultatelor obținute.

Astfel, structura lucrării este concepută într-o succesiune logică, care pornește de la fundamentarea teoretică a sistemelor de propulsie și conduce către dezvoltarea unor modele de analiză aplicabile în condiții reale de exploatare.

Rezultatele obținute contribuie la înțelegerea mecanismelor care guvernează consumul energetic și evidențiază importanța unei abordări integrate în optimizarea sistemelor de propulsie electrică. În acest sens, lucrarea oferă un suport metodologic pentru dezvoltarea unor soluții eficiente de reducere a consumului de energie și de creștere a autonomiei autovehiculelor electrice.

Capitolul 1:
ANALIZA ȘI CLASIFICAREA MULTIDIMENSIONALĂ A SISTEMELOR MODERNE DE PROPULSIE PENTRU AUTOVEHICULE RUTIERE

1.1. Evoluția principiilor de conversie energetică

Transformarea sistemelor de propulsie ale autovehiculelor rutiere reprezintă una dintre cele mai semnificative evoluții tehnologice din ingineria transporturilor moderne, determinată de constrângeri legislative privind reducerea emisiilor de gaze cu efect de seră, creșterea eficienței energetice și integrarea transportului în ecosistemul energetic bazat pe surse regenerabile[1],[2],[4],[5]. În acest context, electrificarea progresivă a sistemului de propulsie nu constituie doar o alternativă la motorul cu ardere internă, ci o reconfigurare structurală a arhitecturii autovehiculului și a interacțiunii acestuia cu infrastructura energetică.

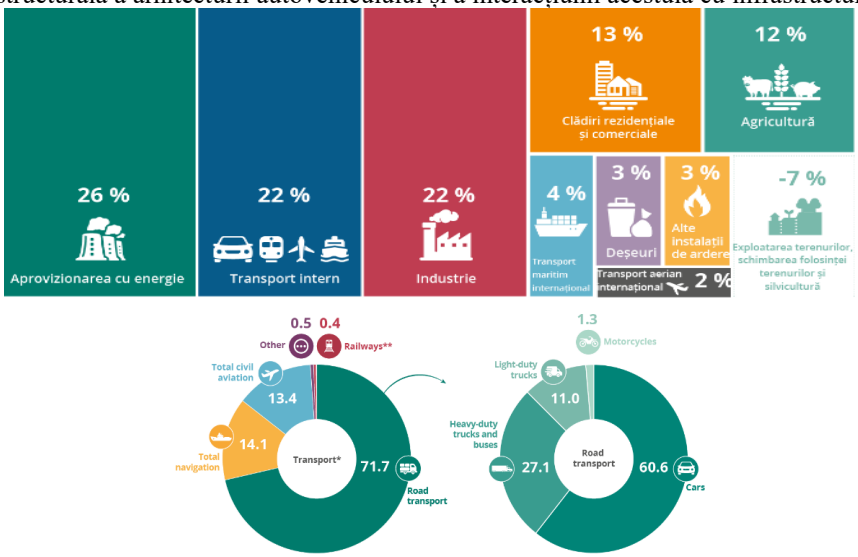


Figura 1.1. Sursele emisiilor de gaze cu efect de seră în Uniunea Europeană [4]

Potrivit Agenției Europene a Energiei (EEA), sectorul transporturilor reprezintă aproximativ un sfert din emisiile totale de gaze cu efect de seră ale Uniunii Europene, transportul rutier fiind componenta dominantă (Figura 1.1) [4]. În acest context, tranziția către electromobilitate devine un pilon central al politicilor climatice europene, inclusiv în cadrul Pactului Verde European și al pachetului legislativ „Fit for 55", care prevede reducerea emisiilor cu cel puțin 55 % față de nivelul anului 1990 până în 2030 și atingerea neutralității climatice până în 2050.

În acest sens, conversia electromecanică reprezintă o alternativă complet diferită, permițând transformarea directă a energiei electrice în lucru mecanic prin interacțiunea câmpurilor electromagnetice. Mașinile electrice moderne pot atinge randamente ridicate pentru o gamă largă de puncte de funcționare și oferă posibilitatea unui control precis al cuplului și vitezei, ceea ce constituie un avantaj major în aplicațiile de tracțiune [22], [23], [24].

Sistemele hibride combină conversia termomecanică și cea electromecanică, permițând operarea motorului termic în zone de randament superior și compensarea solicitărilor tranzitorii prin motorul electric. Performanța acestor sisteme depinde în mod direct de strategia de management energetic, de dimensionarea componentelor și de integrarea informațiilor predictive privind profilul de utilizare al autovehiculului [25],[26], [27]. Astfel, hibridizarea reprezintă o soluție de optimizare în faza de tranziție către electrificarea completă.

Din perspectivă tehnologică, evoluția sistemelor de propulsie poate fi descrisă ca un continuum, de la configurații cu grad redus de electrificare la sisteme complet electrice, caracterizate prin integrarea bateriei ca element structural, utilizarea arhitecturilor de înaltă tensiune și creșterea rolului componentelor software în controlul funcționării [28], [29]. În paralel, dezvoltarea infrastructurii de încărcare și a strategiilor avansate de management energetic contribuie la creșterea fezabilității operaționale a autovehiculelor electrice.

Dezvoltarea sistemelor electrice este condiționată de limitările actuale ale stocării electrochimice, densitatea energetică a bateriilor fiind semnificativ inferioară combustibililor convenționali influențând astfel, masa și autonomia autovehiculului. Cercetarea actuală vizează creșterea densității energetice, îmbunătățirea stabilității electrochimice și reducerea dependenței de materiale critice, alături de tehnologii avansate de reciclare [30], [31],[32].

1.2. Clasificarea multidimensională a sistemelor de propulsie

Clasificarea sistemelor moderne de propulsie necesită utilizarea unor criterii inginerești cuantificabile, care permit nu doar descrierea arhitecturilor, ci și evaluarea comparativă a performanței energetice.

În contextul complexității sistemelor actuale, o abordare multidimensională este esențială pentru a evidenția relațiile dintre sursa de energie, mecanismele de conversie, arhitectura sistemului și eficiența globală [17],[19],[20],[29].

Din perspectivă energetică, aceste criterii nu sunt independente, ci contribuie împreună la definirea nivelului de pierderi și a consumului energetic al autovehiculului, ceea ce justifică analiza lor integrată.

1.2.1. Clasificarea după natura sursei primare de energie

Clasificarea după natura sursei primare de energie evidențiază forma inițială a energiei utilizate în procesul de conversie și determină structura lanțului energetic, precum și tipul pierderilor dominante [5],[9]:

- *surse chimice convenționale* – combustibili fosili lichizi (benzină, motorină) sau gazoși (GPL, GNC). Energia este stocată sub formă chimică, iar conversia are loc prin reacții de oxidare cu eliberare de căldură. Caracteristica definitorie este densitatea energetică ridicată raportată la masă și volum;
- *surse electrochimice (baterii)* – energia este stocată electrochimic și convertită direct în energie electrică, eliminând etapa termică intermediară. Aici performanța depinde de eficiența ciclului încărcare–descărcare și de condițiile de operare [30],[32];
- *vectori energetici pe bază de hidrogen* – hidrogenul este utilizat ca vector energetic; conversia chimică în electricitate are loc electrochimic, fără ardere. Impactul sistemic depinde de metoda de producere a hidrogenului;
- *combustibili sintetici (e-fuels)* – obținuți din energie regenerabilă și CO_2 captat; utilizarea finală implică conversie termomecanică, însă energia primară poate fi regenerabilă.

Natura sursei primare de energie determină structura lanțului de conversie energetică și tipul pierderilor dominante, influențând direct eficiența globală și consumul energetic.

În consecință, alegerea sursei primare nu determină doar tipul de energie utilizată, ci definește nivelul de pierderi și eficiența energetică globală a sistemului.

1.2.2. Clasificarea după mecanismul de conversie energetică

Mecanismul de conversie energetică definește modul fizic de transformare a energiei în lucru mecanic și stabilește limitele teoretice de randament ale sistemului [22],[23],[36] și aici avem:

- *conversie termomecanică* – energia chimică este transformată în energie termică, apoi în lucru mecanic prin expansiunea gazelor; proces guvernat de legile termodinamicii și limitat de randamentul ciclului;
- *conversie electromecanică* – energia electrică este convertită direct în energie mecanică prin interacțiunea câmpurilor electromagnetice; proces descris prin relațiile lui Maxwell și relațiile câmp-curent-cuplu reducând numărul etapelor de conversie și implicit pierderile energetice;
- *conversie electrochimică directă* – celulele de combustie transformă energia chimică în electricitate prin reacții redox controlate electrochimic, cu randamente superioare proceselor termice clasice; elimină etapa termică, însă introduce dependențe de procesele electrochimice și de condițiile de funcționare;
- *conversii hibride* –integrarea simultană a mecanismelor termice și electrice, performanța rezultând din strategia de gestionare a fluxurilor energetice [25],[26].

Prin urmare, mecanismul de conversie determină nu doar eficiența teoretică, ci și modul în care pierderile se distribuie în sistem.

1.2.3. Clasificarea după arhitectura cinematică

Arhitectura cinematică corespunde în principal configurației drivetrain-ului și descrie modul de transmitere a puterii către roți și influențează pierderile mecanice, masa sistemului și flexibilitatea controlului [37], [38]. Așadar, din acest punct de vedere avem:

- *transmisie mecanică directă* caracteristică sistemelor convenționale, unde motorul este conectat la roți prin cutie de viteze, arbore de transmisie și punte motoare.
- *arhitectură electrică centralizată* la care motorul electric este amplasat central și transmite cuplul printr-un reductor unic.
- *arhitectură distribuită (e-axle,* motoare în roată *(in-wheel)),* la care unitatea motor–invertor–reductor este integrată la nivelul punții sau chiar în butucul roții și permite vectorizarea cuplului și control dinamic avansat.
- *arhitecturi cu divizare de putere (power-split),* ce se bazează pe mecanisme planetare și cuplaje electromecanice care permit distribuirea continuu variabilă a fluxului de putere între sursele de propulsie (motorul termic, motoarele electrice) și transmisie.

Arhitectura influențează masa, complexitatea, eficiența mecanică și posibilitățile de control. Astfel, arhitectura nu influențează doar configurația mecanică, ci determină direct pierderile și performanța energetică.

1.2.4. Clasificarea după gradul de electrificare

Gradul de electrificare α caracterizează contribuția componentelor electrice la tracțiune și influențează direct eficiența energetică a sistemului și poate fi cuantificat prin raportul dintre puterea electrică maximă instalată și puterea maximă totală disponibilă la sistem:

$$\alpha = \frac{P_{el,max}}{P_{total,max}}, \qquad \alpha \in [0,1] \tag{1.1}$$

unde $P_{total,max}$ reprezintă puterea maximă efectiv livrabilă la roți în condiții nominale.

Definirea puterii totale și a contribuției componentelor electrice este standardizată la nivelul industriei auto prin metodologii specifice. Acest parametru poziționează sistemele pe un spectru continuu, de la propulsie exclusiv termică ($\alpha = 0$) la propulsie integral electrică ($\alpha = 1$) [17],[25].

Astfel, parametrul α oferă un instrument unitar de analiză și clasificare a arhitecturilor de propulsie, evidențiind tranziția graduală de la sisteme convenționale la soluții complet electrificate, în contextul evoluției tehnologice a sistemelor de propulsie rutieră. Așadar, parametrul α nu reprezintă doar un criteriu de clasificare, ci un indicator direct al eficienței energetice și al nivelului de pierderi din sistem.

1.2.5. Clasificarea după performanța energetică globală

Evaluarea performanței energetice necesită analiza lanțului complet de conversie, întrucât pierderile nu sunt limitate la nivelul autovehiculului. Evaluarea comparativă a tehnologiilor necesită utilizarea indicatorilor:

- *Tank-to-Wheel (T-W)* reprezintă eficiența conversiei energiei stocate în autovehicul în energie mecanică la roată. Este adecvată pentru analiza performanței interne a sistemului;
- *Well-to-Tank (W-T)* evaluează energia consumată pentru producerea și transportul sursei energetice;
- *Well-to-Wheel (W-W)* reprezintă eficiența globală a lanțului energetic, de la sursa de producere a energiei la energia mecanică transmisă la roată ,definită prin:

$$\eta_{W-W} = \eta_{W-T} \cdot \eta_{T-W} \tag{1.2}$$

Evaluarea completă a performanței energetice a sistemelor de propulsie se realizează prin analiza Well-to-Wheel [8],[9],[35] care evidențiază faptul că eficiența globală este determinată de produsul eficiențelor parțiale, ceea ce implică faptul că pierderile din fiecare etapă se acumulează multiplicativ.

În mod similar, fluxul energetic de tracțiune poate fi exprimat ca produs al randamentelor etapelor de conversie, ceea ce permite o analiză unitară a diferitelor arhitecturi.

Fluxul energetic de tracțiune poate fi reprezentat printr-un lanț generalizat de n etape de conversie și transmitere, fiecare caracterizată printr-un randament parțial η_i. Dacă $P_{bat}(t)$ este puterea disponibilă la intrarea în lanțul energetic, iar $P_R(t)$este puterea mecanică la roată, atunci:

$$P_R(t) = P_{bat}(t) \prod_{i=1}^{n} \eta_i \tag{1.3}$$

În consecință:

$$\eta_{T-W} = \frac{P_R(t)}{P_{bat}(t)} = \prod_{i=1}^{n} \eta_i \tag{1.4}$$

Această abordare evidențiază faptul că optimizarea consumului energetic nu poate fi realizată local, la nivelul unui singur subsistem, ci necesită o abordare integrată asupra întregului lanț energetic.

1.3. Configurații principale ale sistemelor de propulsie

Pe baza criteriilor de clasificare prezentate anterior, sistemele moderne de propulsie pot fi grupate în câteva configurații fundamentale care acoperă principalele modalități de conversie energetică utilizate în transportul rutier. Din perspectivă tehnică, aceste configurații nu se diferențiază doar prin tipul sursei de energie, ci mai ales prin structura lanțului de conversie, prin numărul etapelor intermediare și prin nivelul pierderilor asociate fiecărei etape.[19], [20],[1].

În acest cadru, arhitecturile de propulsie pot fi organizate în trei clase majore:

- *sisteme de propulsie cu motor cu ardere internă (*ICE*)* – propulsie convențională prin motor cu ardere internă (m.a.i.), bazată pe conversia energiei chimice a combustibilului în energie mecanică prin procese termodinamice ciclice [10], [21].
- *sistemele de propulsie electrică* [19], [20] împărțite în sisteme cu**:**
  - *propulsie pur electrică* este definită ca un sistem de tracțiune bazat exclusiv pe conversia electromecanică a energiei, în care energia este stocată în baterii reîncărcabile alimentate din rețeaua electrică;
  - *propulsie electrică bazată pe conversie electrochimică* ce utilizează o celulă de combustie alimentată cu hidrogen, care permite generarea de energie electrică la bordul autovehiculului, fără necesitatea stocării acesteia în cantități mari în baterii;

- *propulsie electrică dominantă, de tip range extender*, care constă într-un sistem în care tracțiunea este asigurată în principal de un motor electric alimentat de o baterie reîncărcabilă, iar un generator termic auxiliar produce energie electrică suplimentară pentru extinderea autonomiei, fără a exista o cuplare mecanică directă între motorul termic și roți.

- *sistemele de propulsie hibridă,* în care conversia termomecanică și cea electromecanică sunt integrate într-o arhitectură energetică comună și sunt divizate în [25],[26],[39]:
  - *propulsie hibridă* prin integrarea motorului cu ardere internă și a motorului electric, *fără posibilitatea încărcării externe a bateriei*;
  - *propulsie hibridă cu încărcare externă a bateriei din rețeaua electrică*, combinând sursa electrică și motorul cu ardere internă.

Această abordare multidimensională a clasificării oferă un cadru coerent de analiză comparativă a arhitecturilor de propulsie, corelat cu performanța energetică globală și cu potențialul de decarbonizare al fiecărei soluții.

În acest context, diferențele dintre configurații nu trebuie interpretate exclusiv la nivelul mecanismului de conversie, ci la nivelul întregului sistem tehnic. Tipul de propulsie influențează arhitectura constructivă a autovehiculului, distribuția maselor, integrarea subsistemelor auxiliare, complexitatea controlului și, în final, consumul energetic operațional. Din acest motiv, analiza comparativă a configurațiilor fundamentale este necesară pentru a înțelege modul în care arhitectura de propulsie condiționează performanța energetică globală și potențialul de decarbonizare.

1.4. Sinteză privind performanța energetică a arhitecturilor de propulsie

Compararea principalelor configurații electrificate evidențiază tendința generală de creștere a eficienței energetice odată cu intensificarea electrificării lanțului de propulsie. Reducerea numărului de conversii intermediare și creșterea ponderii energiei electrice utilizate direct conduc, în general, la îmbunătățirea randamentului global și la diminuarea emisiilor locale.

Analiza comparativă evidențiază existența unor compromisuri fundamentale între:

- eficiență energetică și autonomie operațională;
- simplitatea arhitecturală și flexibilitatea funcțională;
- performanța energetică și maturitatea infrastructurii energetice disponibile.

În consecință, nu poate fi identificată o soluție universal optimă, alegerea arhitecturii de propulsie fiind dependentă de scenariul de utilizare și de cerințele aplicației. În acest context, BEV-urile se disting prin eficiență energetică ridicată și simplitate constructivă relativă, ceea ce justifică interesul crescut pentru dezvoltarea și optimizarea acestora.

Cu toate acestea, performanța energetică a autovehiculului electric nu este determinată exclusiv de avantajele arhitecturale generale, ci și de comportamentul real al subsistemelor electrochimice, electrice, electromecanice și termice care compun lanțul energetic. Din acest motiv, evaluarea riguroasă a performanței BEV necesită o analiză detaliată a fluxurilor energetice interne, a pierderilor distribuite și a interdependențelor dintre subsisteme, aspecte dezvoltate în capitolele următoare

Capitolul 2:
ANALIZA ARHITECTURII FUNCȚIONALE ȘI A SUBSISTEMELOR DE PROPULSIE ALE AUTOVEHICULULUI ELECTRIC CU BATERII

Autovehiculul electric cu baterii, prezentat anterior, este analizat în continuare din perspectiva arhitecturii funcționale și a subsistemelor de propulsie. Din punct de vedere structural, un autovehicul electric modern este alcătuit dintr-un ansamblu de subsisteme interdependente, care asigură stocarea, conversia, distribuția și utilizarea energiei electrice [17], [36].

2.1. Sistemul de stocare a energiei

Sistemul de stocare a energiei (Energy Storage System – ESS) constituie componenta principală responsabilă de furnizarea energiei electrice necesare propulsiei autovehiculului electric și este analizat în continuare din punct de vedere constructiv și funcțional [46],[47].

Energia electrică stocată în pachetul de baterii poate fi exprimată prin relația:

$$E_{bat} = C_{nom} \cdot U_{bat} \tag{2.1}$$

unde E_{bat} reprezintă energia electrică stocată, C_{nom} capacitatea nominală în [Ah], iar U_{bat} tensiunea nominală a pachetului în [V].

Dintre chimiile de baterii utilizate în autovehiculele moderne cele mai răspândite sunt litiu-fier-fosfat (LFP), litiu-nichel-mangan-cobalt (NMC) și litiu-nichel-cobalt-aluminiu (NCA).

2.2. Sistemul de management al bateriei

Sistemul de management al bateriei (Battery Management System – BMS) asigură monitorizarea și controlul funcționării pachetului de baterii, având un rol relevant în siguranța, performanța și durabilitatea sistemului de stocare a energiei [14],[47],[51],[53].

BMS monitorizează în timp real parametrii esențiali ai bateriei, inclusiv tensiunile individuale ale celulelor și modulelor, curentul pachetului, temperaturile locale, rezistența internă estimată, precum și stările interne ale sistemului, respectiv starea de încărcare (State of Charge – SoC) și starea de sănătate (State of Health – SoH) [14],[51]. Pe baza acestor informații, sistemul implementează funcții de protecție și control, precum limitarea curenților de încărcare și descărcare, prevenirea supratensiunii și subtensiunii, controlul contactorilor de înaltă tensiune și gestionarea echilibrării celulelor [14], [47].

2.3. Sistemul de conversie a puterii

Sistemul de conversie a puterii asigură interfața energetică dintre bateria de tracțiune și motorul electric, realizând conversia energiei electrice din curent continuu în curent alternativ trifazat. Această conversie este realizată prin intermediul invertorului utilizând dispozitive semiconductoare de putere comandate prin tehnici de modulație PWM, care permit generarea unei tensiuni trifazate cu amplitudine și frecvență variabilă [36], [17], [9].Adoptarea tehnologiei SiC este strâns corelată cu migrarea către arhitecturi electrice de înaltă tensiune, de ordinul 800 V și peste.

În prezent, evoluția sistemelor de conversie a puterii este caracterizată de integrarea invertorului în unități compacte de tip e-drive sau e-axle, în care motorul electric, invertorul și transmisia mecanică sunt reunite într-un ansamblu unic [66], [67], [68]. Această soluție conduce la reducerea masei și volumului sistemului, la scurtarea traseelor de curent și la creșterea densității de putere.

2.4. Motorul electric de tracțiune

Motorul electric de tracțiune reprezintă elementul central al lanțului cinematic al unui autovehicul electric cu baterii. În regim motor, acesta transformă energia electrică în cuplu electromagnetic și putere mecanică, iar în regim generator recuperează o parte din energia cinetică a autovehiculului în timpul decelerării și frânării regenerative [8], [9], [58].

2.4.1. Motorul asincron

Motorul asincron *(IM/ASM)* constituie o soluție pentru propulsia autovehiculelor electrice ce se remarcă printr-o bună fiabilitate în exploatare și este caracterizat de absența magneților permanenți, ceea ce reduce dependența de materiale critice și conferă robustețe constructivă [74], [29]. Figura 2.2 ilustrează schema constructivă generală a unui motor asincron utilizat în aplicații de tracțiune.

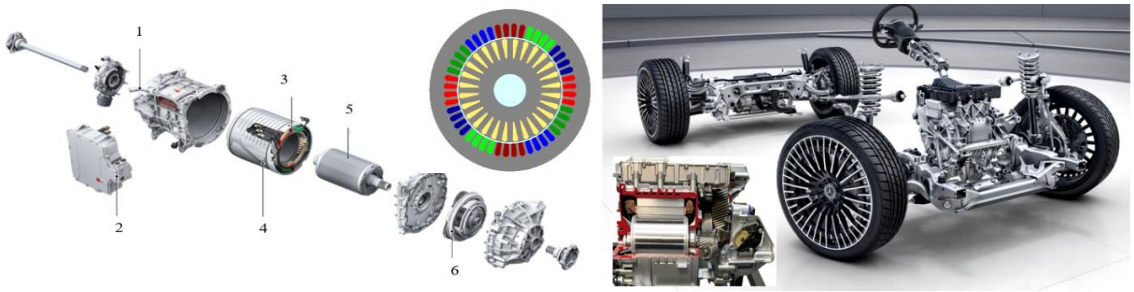


Figura 2.2. Schema constructivă a motorului asincron utilizat în tracțiune electrică [41]
1-alimentare sistem de răcire; 2 – invertor; 3 stator; 4 – sistem de răcire; 5 – rotor in scurtcircuit; 6 – reductor de viteză

În modelul echivalent clasic, cuplul electromagnetic al motorului IM poate fi exprimat, într-o formă simplificată, prin relația:

$$M_e = \frac{s \cdot E_2^2 \cdot R_2}{R_2^2 + (s \cdot X_2)^2} \tag{2.2}$$

unde s este alunecarea, E_2 este tensiunea indusă în rotor, iar R_2 și X_2 sunt rezistența și reactanța rotorului raportate la stator.

2.4.2. Motorul sincron cu magneți permanenți

Motoarele sincrone cu magneți permanenți (PMSM) reprezintă configurația dominantă în aplicațiile BEV moderne, fiind preferate datorită eficienței ridicate și integrării favorabile în arhitecturi compacte de tip e-axle [24], [78].Dintre variantele constructive utilizate în propulsia electrică a autovehiculelor rutiere, configurația cu magneți permanenți interiori (Interior Permanent Magnet - IPM-PMSM) este deosebit de importantă, deoarece permite valorificarea atât a cuplului electromagnetic produs de fluxul magneților, cât și a componentei de reluctanță [19],[50],[58],[79],[80].

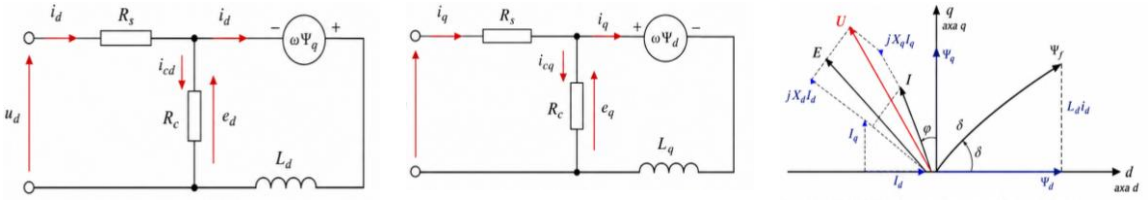
Ecuația generală a cuplului electromagnetic, exprimată în sistemul de axe rotitoare d-q, este [18]:

$$M_e = \frac{3}{2} \cdot p \cdot \left[\psi_f \cdot i_q + (L_d - L_q) i_d . i_q\right] \tag{2.3}$$

unde p reprezintă numărul de perechi de poli.

Analiza și controlul motoarelor de tracțiune se realizează frecvent în sistemul de coordonate sincrone d-q, obținut prin transformarea Park. Pentru această categorie de motoare, expresiile fluxurilor în coordonate d-q sunt:

$$\psi_d = L_d \cdot i_d + \psi_f$$
$$\psi_q = L_q \cdot i_q \qquad (2.4)$$



a) schema pe axa longitudinală d b) schema pe axa transversală q c) diagrama fazorială

Figura 2.3 Schemele echivalente pe axele d-q precum și diagrama fazorială a unui motor sincron

u_d și u_q -componentele tensiunii statorice pe axele dși q; i_d și i_q -componentele curentului statoric pe axele d și q; R_s- rezistența de fază a înfășurarii statorice; R_c- rezistența echivalentă a pierderilor în miezul feromagnetic (pierderi în fier); ψ_f – fluxul magnetic de excitație generat de magneții permanenți ai rotorului; ψ_d și ψ_q- componentele fluxului magnetic pe axele dși q; L_d și L_q- inductanțele sincrone pe axele dși q; X_d și X_q- reactanțele sincrone pe axele dși q; U – tensiunea statorică de fază; I – curentul statoric; E- tensiunea electromotoare indusă

2.4.3. Configurații hibride PMSM - ASM în autovehiculele electrice moderne

În arhitecturile moderne de autovehicule electrice se observă o tendință clară către utilizarea configurațiilor hibride PMSM + ASM, în special în cazul sistemelor de tracțiune integrală. În această configurație, motorul sincron cu magneți permanenți este montat, de regulă, pe puntea principală, iar motorul asincron este utilizat pe puntea secundară [69], [74].



Figura 2.5 Configurație hibridă PMSM + ASM în autovehiculele electrice moderne [20]

Un avantaj important al motorului asincron constă în faptul că, în absența alimentării, acesta nu generează pierderi magnetice semnificative, ceea ce permite decuplarea sa eficientă din punct de vedere energetic. Astfel, în regim normal de funcționare, autovehiculul poate opera predominant cu motorul PMSM, reducând consumul energetic total.

2.4.4. Motorul sincron cu excitație electromagnetică

Motoarele sincrone cu excitație electromagnetică ((EESM) reprezintă o alternativă la motoarele cu magneți permanenți, în care fluxul rotoric este generat printr-o înfășurare de excitație electromagnetică, permițând controlul activ al câmpului magnetic [70], [60], [67].



Figura 2.6 Motoare EESM folosite ca motoare de tracțiune pe autovehicule electrice

a) motor EESM din BMW iX M60 [60], b) motor EESM folosit in Renault Megane E-TECH[70].

Adoptarea EESM este determinată în principal de dorința de eliminare a materialelor magnetice rare și de creștere a sustenabilității lanțului de aprovizionare. În același timp, aceste motoare permit o flexibilitate ridicată în controlul electromagnetic, însă implică o complexitate constructivă mai mare și pierderi suplimentare asociate circuitului de excitație [80], [82].Din punct de vedere matematic, cuplul electromagnetic devine:

$$M_e = \frac{3}{2} p\left[k_f i_f i_q + (L_d - L_q) i_d i_q\right] \qquad (2.5)$$

2.4.5. Motoarele sincrone de reluctanță și variantele asistate cu magneți permanenți

Motoarele sincrone de reluctanță (SynRM) și variantele asistate cu magneți permanenți(PM-assisted SynRM) reprezintă o soluție tehnologică emergentă în domeniul propulsiei electrice, oferind un compromis între eficiență, cost și independență față de materiale magnetice critice [83], [86], [87]. Aceste motoare prezintă avantaje importante, precum reducerea sau eliminarea utilizării pământurilor rare, costuri de fabricație mai reduse comparativ cu PMSM, pierderi magnetice reduse în rotor și comportare favorabilă în regim de slăbire a câmpului. În același timp, proiectarea rotorului este mai complexă, iar strategiile de comandă trebuie să valorifice în mod optim componenta de reluctanță [83], [87],[88].

Integrarea motoarelor PM-assisted SynRM în autovehicule electrice moderne reflectă o direcție tehnologică orientată către optimizarea simultană a eficienței energetice și a utilizării materialelor magnetice.

2.4.6. Caracteristica mecanică a motoarelor de tracțiune

Caracteristica mecanică a motorului electric de tracțiune [4]este definită de două domenii principale de funcționare: domeniul de cuplu constant și domeniul de putere constantă.

2.4.7. Strategii de optimizare și control ale motoarelor de tracțiune

În autovehiculele electrice moderne, comanda motoarelor de tracțiune se realizează prin strategii avansate de control, care urmăresc optimizarea simultană a performanței dinamice, a eficienței energetice și a respectării constrângerilor impuse de invertor, baterie și regimul termic al sistemului de propulsie. Aceste strategii permit exploatarea eficientă a motorului electric pe întreg domeniul de funcționare, de la regimul de cuplu constant până la domeniul de putere constantă și regimul de slăbire a câmpului [18],[64],[89], [90, 91],[79].

Strategia MTPA (Maximum Torque per Ampere), denumită în literatura tehnică și „cuplu maxim la amper", are ca obiectiv obținerea cuplului electromagnetic dorit la un curent statoric minim, contribuind direct la reducerea pierderilor Joule și la creșterea randamentului în regimurile uzuale de funcționare [81], [92].

Strategia MTPV (Maximum Torque per Voltage) este utilizată în domeniul de turații ridicate, atunci când funcționarea motorului de tracțiune nu mai este limitată de curent, ci de tensiunea maximă disponibilă la bornele invertorului. În această zonă, creșterea turației determină creșterea tensiunii contraelectromotoare, iar punctul optim de funcționare nu mai poate urma traiectoria MTPA. Prin urmare, controlul se deplasează către o traiectorie care maximizează cuplul electromagnetic pentru o valoare impusă a tensiunii statorice [92],[93].

În aplicațiile din ingineria autovehiculelor, strategiile de optimizare precum MTPA și MTPV sunt implementate în cadrul unor structuri de comandă avansate, capabile să asigure reglajul precis al fluxului și cuplului, respectiv adaptarea la constrângerile electrice și termice ale sistemului.

Comanda orientată după câmp (Field Oriented Control – FOC) reprezintă metoda standard utilizată în acționările electrice de tracțiune, datorită capacității sale de a asigura un control cvasi-decuplat al fluxului și al cuplului electromagnetic [18],[64], [92].

Comanda directă a cuplului (*Direct Torque Control* – DTC) urmărește controlul direct al cuplului electromagnetic și al fluxului magnetic prin selectarea stării invertorului în funcție de erorile instantanee ale acestor mărimi. Principalele avantaje ale metodei constau în răspunsul dinamic rapid și în structura relativ simplă a schemei de control.

Comanda predictivă bazată pe model (*Model Predictive Control* – MPC) reprezintă o direcție modernă de dezvoltare în controlul mașinilor electrice de tracțiune [85],[55], [93]

În anumite aplicații, poziția rotorului nu este măsurată direct cu senzori mecanici, ci este estimată prin metode bazate pe observatori de stare, tensiunea electromotoare inversă (*back-EMF*) sau tehnici de injectare de semnal. Soluțiile de tip *sensorless* reduc costul și complexitatea sistemului, însă implementarea lor robustă devine mai dificilă la viteze foarte mici și în regimuri tranzitorii severe [95].

Funcționarea reală a sistemelor de propulsie electrică este condiționată de o serie de limitări impuse de invertor, de sistemul de stocare a energiei și de regimul termic al componentelor active. Aceste constrângeri determină limitele de performanță ale motorului electric și impun utilizarea unor strategii de control adaptative pentru menținerea funcționării în regim sigur și eficient [93], [72].

2.4.8 Funcționarea motorului de tracțiune în regim generator. Frânarea regenerativă

În autovehiculele electrice, motorul de tracțiune are un caracter funcțional bidirecțional, putând opera atât în regim motor, cât și în regim generator. Regimul generator intervine în mod natural în fazele de decelerare și frânare, constituind baza procesului de frânare regenerativă [96-101].

Puterea regenerată poate fi exprimată prin relația:

$$P_{regen} = -M_e \cdot \omega_m \tag{2.6}$$

unde semnul negativ indică transferul energiei dinspre sistemul mecanic către sistemul electric.

Autovehiculele electrice moderne utilizează strategii integrate de tip *brake blending*, în care cuplul total de frânare rezultă din combinarea frânării regenerative cu frânarea mecanică [96],[100]

2.4.9. Managementul termic al unității integrate de acționare

Creșterea densității de putere și a gradului de integrare în sistemele de propulsie electrică a condus la dezvoltarea unităților integrate de acționare (e-axle), în care motorul electric, invertorul și transmisia sunt reunite într-un ansamblu compact [66,],[67], [68]. Această integrare reduce masa și volumul sistemului, scurtează traseele de curent și contribuie la creșterea densității de putere. Regimul termic al unității de acționare influențează direct performanța și fiabilitatea sistemului. Creșterea temperaturii conduce la majorarea rezistenței electrice, la creșterea pierderilor și la limitarea curentului maxim admis. În aceste condiții, sistemele de control implementează strategii de reducere a performanței (thermal derating), limitând cuplul și puterea pentru a preveni supraîncălzirea componentelor [12], [34], [72], [102].

În concluzie, managementul termic al unității de acționare reprezintă un element important pentru asigurarea performanței și durabilității sistemului de propulsie electrică. Integrarea funcțională și optimizarea transferului de căldură permit exploatarea la nivel ridicat a densității de putere, în condiții de siguranță și eficiență energetică.

2.4.10. Topologii constructive emergente ale motoarelor de tracțiune

În paralel cu soluțiile consacrate utilizate în autovehiculele electrice moderne (PMSM, EESM, IM și SynRM), cercetarea în domeniul motoarelor electrice de tracțiune se orientează către topologii constructive emergente, capabile să ofere densități de putere superioare și o integrare mai eficientă în arhitecturi compacte de tip e-axle [104],[105], [106] . Dintre acestea, motoarele cu flux axial și cele cu flux transversal reprezintă direcții tehnologice promițătoare, aflate însă în stadii diferite de maturitate industrială.

2.5. Transmisia mecanică

În majoritatea aplicațiilor moderne, transmisia este realizată sub forma unui reductor cu raport fix (single-speed), care permite exploatarea eficientă a domeniului larg de funcționare al motorului electric, tipic până la 10.000–20.000 rpm[14],[15]. Această soluție conduce la reducerea complexității constructive, a masei și a pierderilor mecanice.Randamentul transmisiei mecanice este ridicat, având valori tipice în intervalul $\eta_{tr} \approx 0{,}95 \div 0{,}98$. Aceste valori reflectă pierderile reduse asociate angrenajelor moderne, sistemelor de lubrifiere optimizate și nivelului ridicat de precizie constructivă [36], [95], [21].

Analiza arhitecturii energetice a autovehiculului electric evidențiază faptul că performanța globală a sistemului nu este determinată exclusiv de caracteristicile individuale ale componentelor, ci de interacțiunea dintre acestea și de modul în care energia este transferată, convertită și gestionată pe întreg lanțul de propulsie. Prin urmare, modelarea comportamentului energetic al autovehiculului electric necesită un cadru unificat care să coreleze cerințele dinamice de tracțiune cu fluxurile energetice din sistem. Din această perspectivă, analiza arhitecturală realizată în prezentul capitol constituie fundamentul conceptual necesar dezvoltării modelului dinamic longitudinal și a modelului energetic asociat, prezentate în capitolul următor.

Capitolul 3:
MODELAREA DINAMICII LONGITUDINALE A AUTOVEHICULELOR

Modelarea dinamicii longitudinale a autovehiculelor reprezintă baza evaluării performanțelor de tracțiune, a cerinței de putere la roată și a consumului energetic. Dinamica longitudinală a unui autovehicul descrie comportamentul acestuia pe direcția de deplasare, incluzând procesele de accelerare, frânare și menținere a vitezei [21],[10],[109-112].

3.1. Definirea condițiilor de autopropulsare

Performanțele unui autovehicul sunt exprimate prin indicatori specifici care caracterizează capacitatea acestuia de a atinge anumite valori ale vitezei maxime, accelerației și decelerației [111], [21].

Dinamica longitudinală constituie cadrul central pentru descrierea acestui echilibru, corelând cerințele de tracțiune cu rezistențele la deplasare și cu necesarul energetic asociat [21], [50].

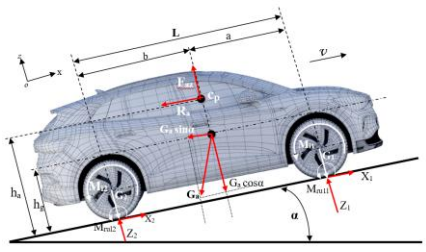


Figura 3.1 Reprezentarea schematică a forțele care acționează asupra autovehiculului în mișcare longitudinală

Forțele de rezistență la înaintare care intervin în modelul longitudinal sunt [110, 111], [21], [10]:

- *rezistența la rulare* R_r , determinată de deformarea pneurilor și a suprafeței de rulare;
- *rezistența aerului* R_a , determinată de interacțiunea automobilului aflat în mișcare și aerului considerat în repaus;
- *rezistența la pantă* R_p , asociată componentei longitudinale a greutății;
- *rezistența la demarare* R_d, asociată variației stării de mișcare a autovehiculului.

3.2 Ecuația generală de mișcare longitudinală

Mișcarea longitudinală a autovehiculului este descrisă prin bilanțul de tracțiune, care exprimă echilibrul dintre forța activă dezvoltată la roțile motoare și totalitatea rezistențelor care se opun deplasării [110, 111], [10], [21].

În forma generală, ecuația bilanțului longitudinal poate fi exprimată prin relația:

$$F_R = R_r + R_a + R_p + R_d \tag{3.9}$$

Această formulare constituie expresia generală a modelului longitudinal și evidențiază faptul că accelerația instantanee a autovehiculului depinde direct de diferența dintre forța de tracțiune disponibilă și suma rezistențelor la înaintare.

3.3. Modelul energetic asociat dinamicii longitudinale

Pentru descrierea completă a funcționării autovehiculului electric cu baterie, modelul mecanic longitudinal trebuie completat printr-un model energetic care să permită determinarea puterii electrice cerute din bateria de tracțiune, respectiv a energiei consumate sau recuperate în funcție de regimul de funcționare al sistemului de propulsie [18],[50], [36],[110, 111]. Modelul energetic stabilește legătura dintre cerința mecanică de tracțiune, determinată de dinamica longitudinală, și fluxurile energetice din lanțul de propulsie electrică.

Puterea electrică furnizată de bateria de tracțiune se obține prin includerea randamentelor lanțului de conversie electromecanică [50], [18]:

$$P_{bat} = \frac{P_{mec}}{\eta_{motor} \cdot \eta_{inv}} \tag{3.10}$$

Energia totală consumată din baterie se determină prin integrarea puterii electrice în timp:

$$E_{bat} = \int P_{bat}(t)\, dt \tag{3.11}$$

Pe baza acestei relații, variația stării de încărcare a bateriei poate fi estimată prin:

$$SoC(t) = SoC_0 - \frac{1}{E_{util}} \int P_{bat}(t)\, dt \tag{3.12}$$

Forța regenerativă disponibilă poate fi exprimată prin:

$$F_{regen} = \frac{M_{regen} \cdot i_0 \cdot \eta_{gen}}{r_d} \tag{3.13}$$

Capacitatea de recuperare este limitată de trei constrângeri principale [17],[18]: limita electromagnetică a mașinii electrice; puterea maximă admisibilă de încărcare a bateriei -$P_{chg,max}$; limita de aderență pneu–cale- $F_{\varphi,max}$.

Astfel:

$$F_{regen,ef} = min\left(F_{regen,motor}, \frac{P_{chg,max}}{v}, F_{\varphi,max}\right) \tag{3.14}$$

Pentru formularea compactă a modelului longitudinal-energetic, se definește forța longitudinală comandată:

$$F_x = \begin{cases} +min(F_{t,disp}, F_{\varphi,max}), & \text{- tracțiune} \\ -min\left(F_{regen,motor}, \frac{P_{chg,max}}{v}, F_{\varphi,max}\right), & \text{- regenerare} \end{cases} \tag{3.15}$$

Ecuația generală a mișcării devine:

$$m_a \cdot \delta \cdot \frac{dv}{dt} = F_x - R_r - R_a - R_p \tag{3.16}$$

Această formulare unificată permite descrierea coerentă a regimurilor de accelerație, rulare staționară și frânare regenerativă în cadrul aceluiași model matematic.

Deoarece procesul de recuperare energetică este limitat de constrângeri electrice, termice și de aderență, energia cinetică disponibilă nu poate fi recuperată integral, existând pierderi inerente în procesele de conversie și stocare energetică.

Capitolul 4:
INDICATORI DE PERFORMANȚĂ ENERGETICĂ AI AUTOVEHICULELOR ELECTRICE

În aceste condiții, evaluarea performanței necesită utilizarea unor indicatori sintetici capabili să descrie consumul energetic, eficiența conversiei, utilizarea resurselor electrice și capacitatea sistemului de a răspunde cerințelor dinamice.

4.1. Indicatori energetici globali

Indicatorii energetici globali permit evaluarea performanței energetice a autovehiculului electric la nivel de sistem, prin cuantificarea raportului dintre energia disponibilă în sistemul de stocare și energia efectiv utilizată pentru realizarea deplasării. Indicatorii care integrează efectele combinate ale cererii dinamice,

rezistențelor la înaintare, randamentelor lanțului de propulsie și proceselor de recuperare energetică, oferind o imagine sintetică asupra eficienței globale a autovehiculului [50],[18],[20] sunt:consumul specific de energie; randamentul global al sistemului de propulsie; autonomia autovehiculului; autonomia specifică; energia recuperată prin frânare regenerativă; eficiența recuperării energiei

4.2 Indicatori electrici și electrochimici

Indicatorii electrici și electrochimici descriu starea energetică instantanee a sistemului de propulsie electrică și limitele sale operaționale, caracterizând atât comportamentul bateriei, cât și constrângerile electrice asociate convertorului static și mașinii electrice. Acestia sunt: evoluția stării de încărcare a bateriei; rata de încărcare/descărcare (C-rate); curentul efectiv și limita de curent; gradul de utilizare a tensiunii

4.3. Indicatori electromecanici și funcționali

Indicatorii electromecanici și funcționali caracterizează capacitatea sistemului de propulsie electrică de a converti energia electrică în energie mecanică utilă și de a asigura performanțele dinamice cerute autovehiculului. Acestia sunt: harta de eficiență a motorului electric; capacitatea de accelerare; viteza maximă

4.4. Indicatori termici

Performanța energetică, fiabilitatea și durabilitatea sistemelor de propulsie electrică sunt puternic influențate de regimul termic de funcționare. În cadrul autovehiculelor electrice cu baterie, pierderile generate în subsistemele electrice, electronice și electromecanice sunt transformate parțial în energie termică, iar acumularea acesteia poate conduce la degradarea performanțelor, limitarea puterii disponibile și accelerarea proceselor de îmbătrânire a componentelor.Ărintre aceștia se regăsec:temperatura componentelor critice; rezerva termică; pierderi termice; capacitatea sistemului de răcire și coeficientul de performanță al sistemului HVAC.

Capitolul 5:
FACTORII DETERMINANȚI AI CONSUMULUI ENERGETIC AL AUTOVEHICULELOR ELECTRICE CU BATERIE

Autovehiculele electrice cu baterie se caracterizează printr-o dependență pronunțată a consumului energetic față de condițiile de exploatare, regimul de funcționare și starea subsistemelor componente. Spre deosebire de autonomia nominală, determinată în condiții standardizate, autonomia reală reprezintă rezultatul interacțiunii dintre cererea de tracțiune, pierderile interne ale sistemului de propulsie, consumul auxiliar și energia efectiv utilizabilă a bateriei [123], [113].

5.1. Clasificarea factorilor de influență asupra consumului energetic

Consumul energetic al unui autovehicul electric este determinat de interacțiunea dintre cererea mecanică impusă de deplasare și eficiența cu care sistemul de propulsie transformă energia stocată în baterie în energie mecanică utilă la roți. Din acest motiv, factorii de influență trebuie analizați atât din perspectiva originii lor fizice, cât și din perspectiva modului în care afectează bilanțul energetic global.

5.2. Factori constructivi ai autovehiculului

Factorii constructivi ai autovehiculului electric definesc arhitectura energetică și limitele de performanță ale sistemului de propulsie. Spre deosebire de factorii operaționali sau de mediu, aceștia sunt determinați prin proiectarea autovehiculului și rămân, în general, invariabili pe durata exploatării. Influența lor asupra consumului energetic se manifestă atât direct, prin modificarea cererii mecanice de tracțiune, cât și indirect, prin afectarea randamentului global al conversiei energetice [10],[125], [126].

În cazul autovehiculelor electrice cu baterie, principalii factori constructivi relevanți pentru consumul energetic sunt reprezentați de caracteristicile motorului electric, configurația transmisiei, masa totală a autovehiculului, rezistența la rulare, performanțele aerodinamice și consumul sistemelor auxiliare. Fiecare dintre acești parametri influențează diferit bilanțul energetic, în funcție de regimul de exploatare și de profilul de deplasare.

5.3. Factori comportamentali și operaționali

Spre deosebire de factorii constructivi, care sunt determinați de configurația tehnică a autovehiculului, factorii comportamentali și operaționali sunt asociați modului efectiv de utilizare a acestuia și prezintă un grad ridicat de variabilitate. Pentru același autovehicul și în condiții similare de mediu, consumul energetic poate varia semnificativ în funcție de stilul de conducere, profilul de viteză și modul de exploatare al funcțiilor disponibile [42],[124],[131].

Acești factori influențează direct cererea instantanee de putere și distribuția punctelor de funcționare ale sistemului de propulsie, modificând atât componenta mecanică a consumului, cât și pierderile asociate conversiei energetice. În cazul autovehiculelor electrice, efectele sunt amplificate de dependența puternică

dintre curentul absorbit, pierderile Joule și comportamentul electro-termic al bateriei și al sistemului de propulsie.

Din această perspectivă, analiza factorilor comportamentali este esențială pentru înțelegerea variațiilor consumului energetic în exploatarea reală și pentru fundamentarea strategiilor de conducere economică și de management energetic.

5.4. Factori de mediu și infrastructură rutieră

Pe lângă caracteristicile constructive ale autovehiculului și factorii comportamentali, consumul energetic al autovehiculelor electrice este influențat semnificativ de condițiile externe de exploatare. Factorii de mediu și infrastructura rutieră modifică simultan solicitarea mecanică, performanța electrochimică a sistemului de stocare și eficiența subsistemelor auxiliare, conducând la variații importante ale autonomiei reale [89], [124].

Spre deosebire de factorii constructivi, care sunt inerent determinați de configurația tehnică a autovehiculului, factorii externi prezintă un caracter puternic variabil și, în multe situații, dificil de controlat. Aceștia influențează atât componentele directe ale bilanțului longitudinal de tracțiune, prin modificarea rezistențelor la înaintare, cât și consumul energetic auxiliar, prin necesitatea adaptării sistemelor de management termic și climatizare.

În acest context, evaluarea performanței energetice reale a autovehiculului electric necesită includerea explicită a acestor influențe în analiza consumului și a autonomiei.

5.5. Factori asociați degradării și stării sistemului de stocare

Performanța energetică a autovehiculului electric nu este determinată exclusiv de parametrii nominali ai sistemului de stocare, ci și de evoluția în timp a caracteristicilor electrochimice ale bateriei. Pe parcursul exploatării, procesele ireversibile de degradare conduc la reducerea capacității disponibile, creșterea rezistenței interne și limitarea puterii furnizabile, afectând direct consumul energetic, performanțele dinamice și autonomia reală*)* [132], [133].

Starea bateriei reprezintă un factor determinant al performanței energetice pe termen lung, influențând simultan autonomia, eficiența conversiei și performanțele dinamice ale autovehiculului electric. Reducerea capacității disponibile și creșterea rezistenței interne conduc la degradarea progresivă a performanței globale, efect amplificat de condițiile de exploatare și strategiile de utilizare. Din această perspectivă, evaluarea realistă a consumului energetic și a autonomiei necesită integrarea explicită a fenomenelor de degradare electrochimică în modelele de analiză energetică.

5.6. Sinteza influenței factorilor asupra consumului energetic

Analiza factorilor determinanți ai consumului energetic evidențiază caracterul sistemic și multi-parametric al performanței energetice a autovehiculului electric. Rezultă că autonomia reală și consumul specific nu reprezintă mărimi fixe asociate exclusiv configurației constructive a autovehiculului, ci variabile dependente de interacțiunea dintre cererea de tracțiune, eficiența conversiei energetice și condițiile concrete de exploatare.

Din punct de vedere metodologic, factorii analizați pot fi interpretați prin mecanisme distincte de influență asupra bilanțului energetic: modificarea cererii mecanice de putere (masă, pantă, accelerație, viteză), modificarea eficienței conversiei energetice (harta de eficiență a motorului, transmisie, limitări electrice și termice), respectiv reducerea energiei efectiv disponibile pentru propulsie (sarcini auxiliare, temperatură, degradarea bateriei).

Această clasificare evidențiază faptul că influența factorilor nu este independentă, ci puternic intercorelată. Spre exemplu, creșterea vitezei amplifică simultan solicitarea aerodinamică, mută punctul de funcționare al motorului în alte regiuni de eficiență și poate conduce la creșterea solicitărilor termice ale sistemului. În mod similar, temperaturile extreme afectează simultan performanța electrochimică a bateriei, consumul auxiliar și limitele de putere disponibile. În consecință, variațiile consumului energetic trebuie analizate într-un cadru integrat, și nu prin evaluarea izolată a fiecărui parametru.

Capitolul 6:
ANALIZA NUMERICĂ PARAMETRICĂ A CONSUMULUI ENERGETIC AL AUTOVEHICULULUI ELECTRIC

6.1. Analiza efectului masei echivalente asupra consumului energetic al unui BEV

Pentru evaluarea modului cum masa echivalentă a autovehiculului influențează componenta inerțială a consumului energetic s-a utilizat profilul de viteză specific ciclului WLTC clasa 3b, definit în cadrul procedurii WLTP, pe baza căruia accelerația a fost determinată prin derivare numerică.

În cadrul analizei au fost considerate trei valori ale masei echivalente: $m_{eq} \in (1500, 1800, 2000)\,\mathrm{kg}$. Energia cumulată asociată accelerațiilor este ilustrată în Figura 6.3. Rezultatele evidențiază o creștere aproape

liniară a energiei în raport cu masa echivalentă, diferențele dintre curbe accentuându-se în zonele cu variații frecvente de viteză. În regimuri de viteză constantă, contribuția masei devine neglijabilă.

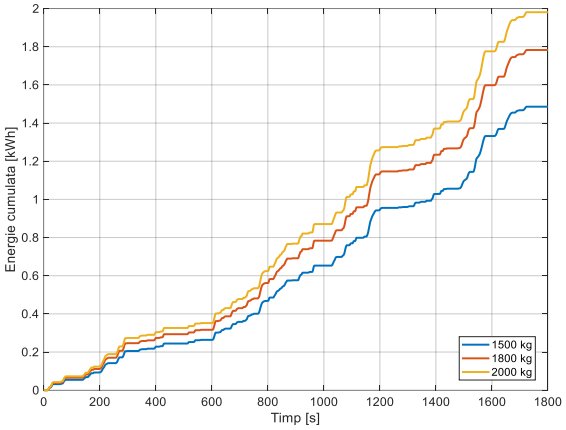


Figura 6.3 Energia cumulată asociată accelerațiilor profilul de viteză WLTC 3b

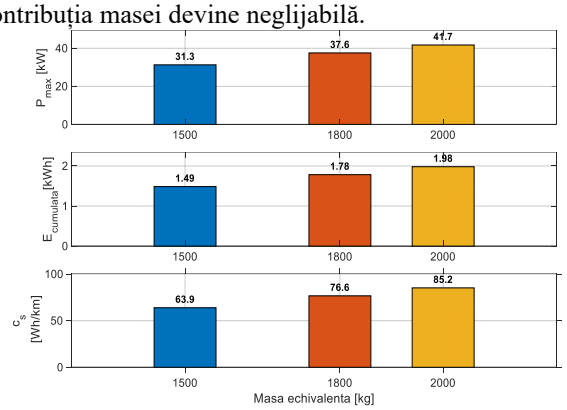


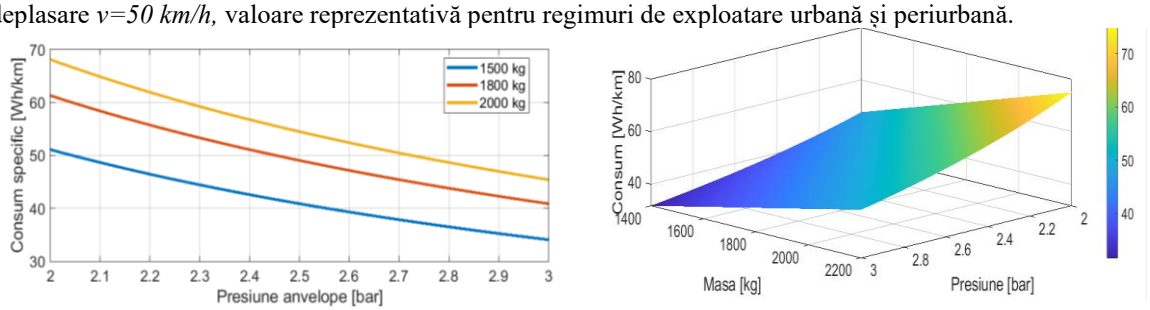
Figura 6.4 Influența masei echivalente asupra :
a) puterii inerțiala maxima [kW]; b) energia cumulată asociată accelerațiilor [kWh];c) consumul specific inerțial în ciclul WLTC clasa 3b [Wh/km]

Consumul specific inerțial obținut pentru valorile analizate ale masei echivalente este prezentat în Figura. 6.4. Se observă că, pentru intervalul 1500–2000 kg, consumul crește de la aproximativ 63.9 Wh/km la 85.2 Wh/km, ceea ce corespunde unei creșteri relative de aproximativ 33%.

6.2. Analiza influenței masei autovehiculului și a presiunii în pneuri asupra consumului asociat rezistenței la rulare

Pentru evidențierea influenței masei autovehiculului și a presiunii în pneuri asupra consumului energetic asociat rezistenței la rulare, a fost realizată o analiză parametrică în regim staționar. Spre deosebire de secțiunea anterioară, unde masa a fost introdusă prin masa echivalentă asociată componentei inerțiale, în prezenta analiză masa este considerată ca masă a autovehiculului aflată în mișcare de translație. Această distincție este necesară deoarece rezistența la rulare depinde de sarcina normală transmisă pneurilor, nu de energia necesară accelerării maselor rotative.

Au fost analizate trei valori ale masei autovehiculului $m_a \in \{1500, 1800, 2000\}$ kg, iar presiunea în anvelope a fost variată în intervalul p∈[2.0,3.0] bar. Simularea a fost realizată pentru o viteză constantă de deplasare *v=50 km/h,* valoare reprezentativă pentru regimuri de exploatare urbană și periurbană.



a) b)

Figura 6.5 Influența presiunii în pneuri și a masei autovehiculului asupra consumului specific de rulare:
a) variația consumului pentru mase discrete; b) reprezentarea tridimensională a dependenței consumului de masă și presiune

Rezultatele prezentate în Figura 6.5a arată variația consumului specific de rulare în funcție de presiunea în pneuri, pentru cele trei valori ale masei analizate. Se observă că majorarea presiunii conduce la reducerea consumului specific, ca urmare a scăderii coeficientului de rezistență la rulare. În același timp, creșterea masei determină deplasarea curbelor către valori mai mari ale consumului, confirmând influența directă a sarcinii normale asupra rezistenței la rulare.

6.3. Analiza influenței accelerației asupra cererii de putere și a limitării prin aderență

Pentru analiza influenței accelerației asupra solicitării energetice, precum și pentru evidențierea rolului acesteia în dinamica longitudinală a autovehiculului, au fost realizate simulări numerice bazate pe un model simplificat de mișcare.

Din punct de vedere fizic, creșterea accelerației implică o creștere proporțională a forței inerțiale, ceea ce conduce la o solicitare energetică mai ridicată. Astfel, regimurile de accelerație intensă sunt asociate cu valori semnificativ mai mari ale puterii instantanee necesare, comparativ cu regimurile de accelerație moderată. Deși accelerația influențează direct puterea instantanee necesară, consumul energetic total depinde și de durata și frecvența acestor regimuri în cadrul ciclului de rulare.

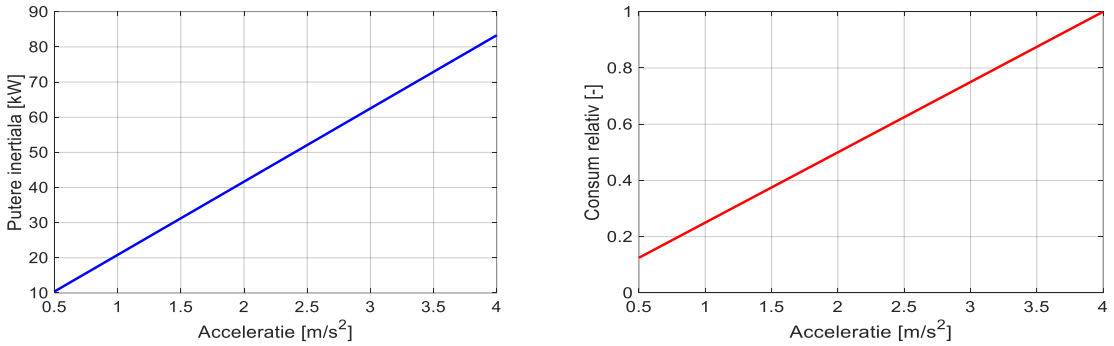


Figura 6.6 Influența accelerației asupra: a) puterii inerțiale; b) cerinței energetice relative

În a doua etapă a analizei a fost investigată influența tipului de tracțiune asupra accelerației maxime a autovehiculului, având în vedere limitările impuse de aderența dintre pneuri și carosabil. Analiza are ca obiectiv evidențierea modului în care distribuția sarcinii pe punți și transferul dinamic de sarcină influențează capacitatea de generare a forței de tracțiune.

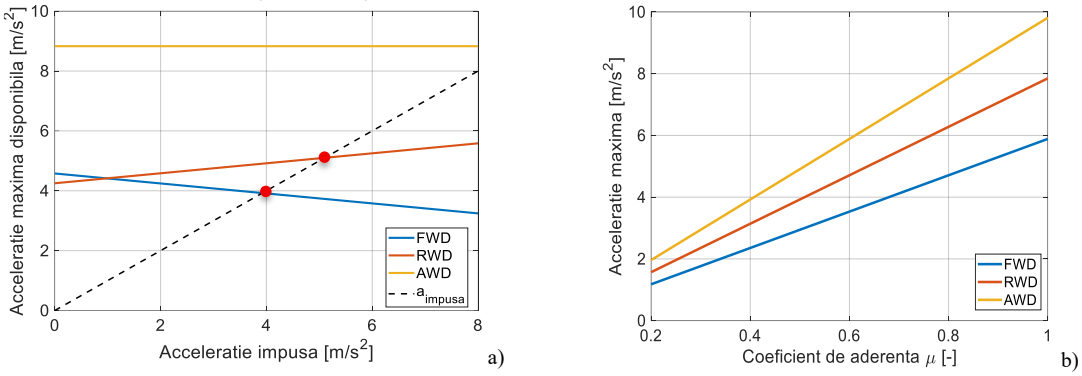


Figura 6.7 Influența tipului de tracțiune asupra accelerației maxime:
a) limitarea accelerației prin aderență pentru configurațiile FWD, RWD și AWD; b) variația accelerației maxime în funcție de coeficientul de aderență.

Rezultatele sunt prezentate în Figura 6.7a, unde este ilustrată variația accelerației maxime disponibile în funcție de accelerația impusă. Linia punctată reprezintă accelerația impusă, iar curbele corespunzătoare celor trei configurații indică limita de accelerație determinată de aderență. Se observă că, în cazul tracțiunii față, accelerația maximă disponibilă scade odată cu creșterea accelerației impuse, ca urmare a transferului de sarcină către puntea spate, ceea ce reduce aderența roților motoare. În schimb, pentru tracțiunea spate, accelerația maximă crește odată cu accelerația impusă, datorită creșterii reacțiunii normale pe puntea spate. În cazul tracțiunii integrale, accelerația maximă rămâne aproximativ constantă, fiind limitată de valoarea maximă a forței de aderență, proporțională cu produsul $\varphi \cdot g$ .Intersecția dintre linia accelerației impuse și curbele accelerației maxime disponibile definește limita de funcționare fără patinare. Dincolo de acest punct, accelerația impusă nu mai poate fi realizată din cauza depășirii limitei de aderență.

Analiza evidențiază faptul că accelerația și tipul de tracțiune influențează performanța autovehiculului prin mecanisme distincte. Accelerația determină în mod direct cerința de putere a sistemului de propulsie, în timp ce tipul de tracțiune și distribuția sarcinii limitează valoarea maximă a accelerației care poate fi realizată în condiții reale de aderență.

Prin urmare, performanța longitudinală a unui autovehicul electric este rezultatul unui compromis între cerința energetică impusă de regimul de exploatare și limitările fizice generate de interacțiunea pneu–carosabil. În acest context, configurațiile de tracțiune integrală oferă cele mai bune performanțe dinamice, în timp ce tracțiunea față este dezavantajată în regimuri de accelerație ridicată.

6.4. Analiza contribuției sistemului HVAC asupra consumului energetic

Pentru a evalua contribuția sistemului HVAC asupra consumului energetic al autovehiculului electric, analiza a fost realizată în regim staționar, considerând deplasarea la viteză constantă. Sistemul HVAC a fost tratat ca un consumator auxiliar, cu putere aproximativ constantă, independentă de regimul de tracțiune.

Au fost analizate două situații: variația consumului specific în funcție de puterea sistemului HVAC și variația acestuia în funcție de condițiile de temperatură ambientală. Intervalul de viteză considerat a fost între 10 și 130 km/h, acoperind atât regimuri urbane, cât și extraurbane.

Rezultatele sunt prezentate în Figura 6.8, unde este ilustrată variația consumului specific asociat sistemului HVAC pentru valori ale puterii cuprinse între 1 kW și 4 kW.

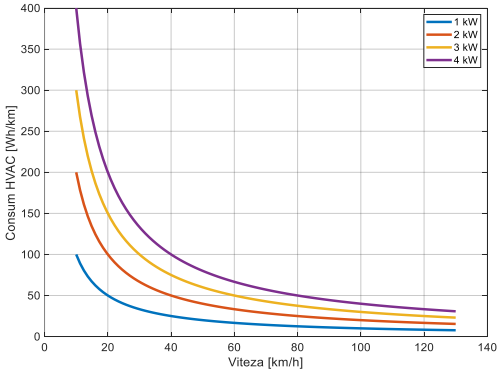


Figura 6.8 Variația consumului specific de energie asociat sistemului HVAC

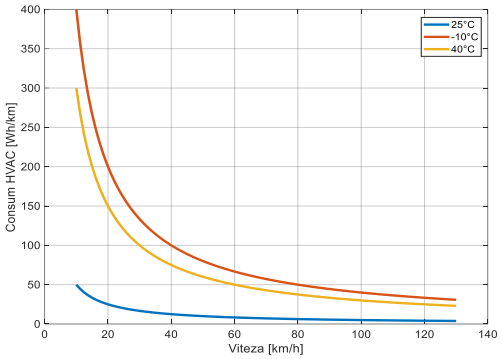


Figura 6.9 Variația consumului specific de energie asociat sistemului HVAC pentru diferite temperaturi ambientale

Analiza evidențiază faptul că consumul specific asociat sistemului HVAC scade neliniar odată cu creșterea vitezei. Diferențele dintre scenariile analizate sunt mai pronunțate la viteze reduse și se diminuează progresiv pe măsură ce viteza crește. La viteze mici (aproximativ 10–30 km/h), contribuția sistemului HVAC devine semnificativă și poate atinge valori comparabile cu cele ale consumului de tracțiune, în special pentru puteri ridicate (3–4 kW). În schimb, la viteze mari, impactul relativ al acestuia se reduce, deoarece aceeași energie este raportată la o distanță mai mare parcursă. Se observă că, pentru puteri ridicate ale sistemului HVAC și viteze reduse, consumul specific poate atinge valori semnificative, evidențiind impactul major al consumatorilor auxiliari în regim urban.

Pentru evaluarea influenței condițiilor climatice au fost definite trei scenarii reprezentative, prin asocierea unor valori caracteristice ale puterii absorbite de sistemul HVAC. Astfel, pentru o temperatură moderată de 25°C s-a considerat o putere de 500 W, corespunzătoare unui regim aproape neutru. Pentru condiții de iarnă (−10°C) a fost adoptată o putere de 4 kW, specifică funcționării sistemului de încălzire, iar pentru condiții de vară (40°C) a fost considerată o putere de 3 kW, asociată funcționării sistemului de răcire.

Indiferent de scenariul analizat, influența sistemului HVAC scade odată cu creșterea vitezei, efectul fiind mai pronunțat la viteze reduse. Acest comportament este consecința directă a relației inverse dintre consumul specific și viteză. În consecință, impactul sistemului HVAC este maxim în regim urban, caracterizat prin viteze reduse și durate mari de funcționare, și minim în regim extraurban.

6.5. Analiza influenței stilului de conducere asupra consumului energetic

Pentru evaluarea influenței stilului de conducere asupra consumului energetic al autovehiculului electric a fost adoptat un model parametric simplificat, în care comportamentul conducătorului auto este introdus prin intermediul unui factor comportamental adimensional k_{drive}, definit în capitolul anterior ca parametru de corecție aplicat consumului energetic de referință.

Rezultatele ilustrate grafic Figura 6.10 evidențiază o creștere sistematică a consumului energetic odată cu trecerea de la un stil de conducere economic la unul agresiv. Comparativ cu regimul Eco, conducerea normală determină o creștere a consumului de≈ 15.8%, iar regimul agresiv conduce la o penalizare energetică de:≈ 36.8%. În raport cu consumul de referință, stilul economic conduce la o reducere de aproximativ 5%, în timp ce stilul agresiv produce o creștere de aproximativ 30%.

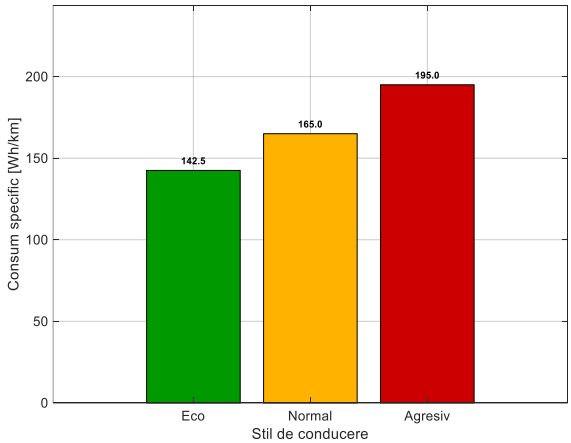


Figura 6.10 Influența stilului de conducere asupra consumului specific de energie

Rezultatele confirmă faptul că stilul de conducere reprezintă un factor operațional important în determinarea consumului energetic, chiar și în condițiile aceluiași autovehicul și ale aceluiași consum de referință. Deși modelul adoptat este unul simplificat și nu reproduce explicit dinamica completă a ciclului de conducere, acesta permite cuantificarea clară a impactului comportamentului șoferului asupra autonomiei energetice.

În consecință, optimizarea stilului de conducere constituie o măsură direct aplicabilă pentru reducerea consumului energetic și creșterea autonomiei reale a autovehiculelor electrice.

Capitolul 7:
METODOLOGIE DE OBȚINERE A HĂRȚII DE EFICIENȚĂ PENTRU UN MOTOR ELECTRIC DE TRACȚIUNE DESTINAT AUTOVEHICULELOR ELECTRICE

Harta de eficiență a motorului electric constituie un instrument important în această analiză, oferind o reprezentare sintetică a performanței energetice în funcție de punctul de operare. Aceasta permite nu doar evaluarea comportării sistemului, ci și optimizarea strategiilor de control și dimensionarea componentelor sistemului de propulsie [22],[134].

În cadrul acestui capitol a fost realizată o metodologie reproductibilă de obținere a hărții de eficiență a motorului electric de tracțiune pornind de la un set redus de date inițiale, hartă utilizată în simularea la nivel de sistem BEV. Abordarea propusă urmărește integrarea etapelor de definire a parametrilor de intrare, caracterizare electromagnetică și validare a punctelor de operare într-un cadru coerent, reproductibil și adaptat etapelor incipiente de proiectare.



Figura 7.1 Testul Performance mapping – Sine wave – Motor – Efficiency map

Metodologia dezvoltată în acest capitol este construită pe ideea că determinarea hărții de eficiență reprezintă un proces iterativ de corelare între: limitele electrice ale sistemului de alimentare, caracteristicile electromagnetice ale motorului și strategiile de comandă aplicate.

După validarea modelului electromagnetic prin determinarea punctului de funcționare, etapa finală a metodologiei constă în obținerea hărții de eficiență a motorului electric, utilizând testul „*Performance Mapping – Sine wave – Motor – Efficiency Map*" din mediul Altair FluxMotor. Această analiză permite caracterizarea completă a performanței energetice a motorului în planul cuplu–viteză, ținând cont de limitele impuse de tensiune, curent și condițiile de funcționare.

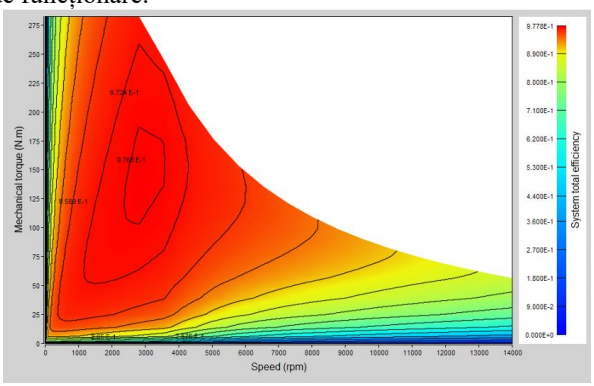


Figura 7.10. Harta de eficiență în FluxMotor

Harta de eficiență este obținută prin evaluarea randamentului pentru fiecare punct de operare valid. Aceasta este definită ca raport între puterea mecanică utilă și puterea electrică absorbită.

Analiza hărții de eficiență permite identificarea regiunilor de operare caracterizate prin: eficiență ridicată (zone optime), pierderi semnificative (zone nefavorabile), tranziții între regimuri de funcționare.

Structura generală a acestei metodologii este sintetizată în Figura 7.18, unde sunt evidențiate principalele etape ale procesului: proiectarea inițială, caracterizarea electromagnetică și integrarea rezultatelor în cadrul analizei sistemului de tracțiune.

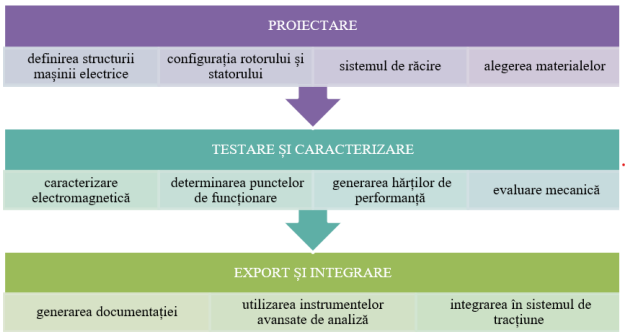


Figura 7.18 Etapele procesului de modelare și analiză a mașinii electrice în mediul FluxMotor

Interpretarea hărții de eficiență este esențială pentru:optimizarea strategiilor de control (MTPA, MTPV),corelarea cu ciclurile de conducere,evaluarea impactului asupra autonomiei autovehiculului

Metodologia propusă a demonstrat că este posibilă construirea incrementală a unui model coerent pornind de la un set minim de date inițiale, specifice etapelor timpurii de proiectare. În acest context, conversia tensiunii magistralei DC, estimarea curentului maxim și corelarea acestuia cu densitatea de curent au fost identificate drept etape esențiale pentru definirea realistă a domeniului de funcționare al motorului.

Caracterizarea electromagnetică în planul curenților d–q a furnizat hărțile care stau la baza strategiilor de comandă și a evaluării performanței energetice, iar validarea punctuală a confirmat consistența internă a modelului și a procedurii de mapare. Rezultă astfel că acuratețea hărții de eficiență depinde simultan de modelarea electromagnetică, de strategia de discretizare și de coerența dintre parametrii electrici și constrângerile aplicației.

În ansamblu, capitolul demonstrează că metodologia propusă realizează legătura dintre modelarea electromagnetică de detaliu și simularea energetică la nivel de sistem, furnizând o bază reproductibilă pentru integrarea motorului electric în analize longitudinale și în evaluarea performanței globale a autovehiculului electric. Această bază metodologică este valorificată în capitolul următor, unde hărțile obținute sunt utilizate pentru analiza comparativă a influenței arhitecturii motorului și a poziției acestuia în lanțul de propulsie.

Capitolul 8:
CERCETĂRI PRIVIND INFLUENȚA ARHITECTURII SISTEMULUI DE PROPULSIE ASUPRA CONSUMULUI ENERGETIC

În acest capitol este analizată influența arhitecturii sistemului de propulsie asupra consumului energetic, luând în considerare atât configurația la nivel de autovehicul, cât și soluțiile constructive la nivel de motor electric. Analiza este realizată comparativ pentru autovehicule hibride și electrice, iar pentru asigurarea comparabilității rezultatelor, toate configurațiile analizate au fost evaluate în aceleași condiții de exploatare, utilizând ciclul WLTC clasa 3b.

8.1. Influența poziționării motorului electric în arhitectura sistemului de propulsie asupra consumului energetic

Pentru a demonstra influența poziționării motorului electric în lanțul cinematic asupra performanței energetice a unui autovehicul mild hybrid a fost dezvoltat un model de simulare în mediul *MATLAB R2023a*, destinat analizei comparative a trei configurații MHEV: P0, P1 și P2 [136].

Studiul [136] are ca obiectiv cuantificarea diferențelor dintre arhitecturile P0, P1 și P2 în condiții identice de exploatare, astfel încât variațiile obținute ale consumului de combustibil, consumului de energie electrică și emisiilor de CO_2 să poată fi atribuite exclusiv arhitecturii sistemului de propulsie [39],[137],[138],[26].

Pentru realizarea comparației între arhitecturile mild hybrid P0, P1 și P2 au fost adoptate următoarele ipoteze de lucru:

- autovehiculul analizat este considerat identic din punct de vedere al parametrilor constructivi și al condițiilor de rulare pentru toate cele trei configurații astfel încât diferențele obținute să fie generate exclusiv de arhitectura sistemului de propulsie;
- motorul termic nu este modelat ca un sistem fizic detaliat, ci printr-un model energetic echivalent, caracterizat printr-un randament global constant. Această simplificare permite evidențierea influenței arhitecturii fără introducerea variațiilor asociate punctului de funcționare;
- randamentele motorului termic și ale motorului electric sunt considerate constante, evitând utilizarea hărților complexe de randament;
- bateria este modelată ca un sistem de 48 V, cu o capacitate de 17 Ah, pornind de la o stare inițială de încărcare de 60%. Evoluția SoC este determinată energetic și limitată în intervalul 20–80%, corespunzător funcționării reale a sistemelor mild hybrid [25], [139];
- pierderile auxiliare și efectele termice nu sunt modelate explicit;
- profilul de viteză utilizat este identic pentru toate configurațiile (WLTC 3b);
- pentru fiecare arhitectură sunt definite valori distincte ale puterii maxime a motorului electric
- strategia de control este deterministă, bazată pe reguli fixe.

Strategia de control implementată [136] are rolul de a repartiza determinist puterea cerută între motorul termic și motorul electric, pe baza acelorași reguli pentru toate arhitecturile analizate. , deoarece elimină influența algoritmului de control asupra comparației și permite evidențierea directă a efectului poziționării motorului electric. Pentru fiecare arhitectură sunt definite valori distincte ale puterii maxime a motorului electric și ale strategia de control este deterministă

Principiile generale sunt sintetizate în Tabelul 8.3.

Tabelul 8.1: Reguli generale ale strategiei de control

Regim de funcționare	Condiție	Acțiune
tracțiune	$P_{total} \geq 0$	repartizare între ICE și EM
boost electric	$P_{total} \geq 0$	EM asistă ICE
rulare electrică	v < 20 km/h (P1, P2)	ICE oprit
frânare	$P_{total} < 0$	recuperare energie (EM)
limitare putere EM	-	$P_{EM} \leq P_{EM,max}$

Rezultatele obținute evidențiază o influență directă și sistematică a arhitecturii asupra performanței energetice a sistemului MHEV. Trecerea de la configurația P0 la P1 și apoi la P2 conduce la reducerea progresivă a consumului de combustibil și a emisiilor de CO_2, concomitent cu creșterea utilizării energiei electrice și a capacității de regenerare. Deoarece toate simulările au fost realizate în aceleași condiții și cu aceeași logică de control, aceste diferențe pot fi atribuite exclusiv modului de integrare a motorului electric în lanțul cinematic. Analiza globală a performanțelor energetice este prezentată în Tabelul 8.4 care sintetizează principalii indicatori energetici pentru cele trei configurații MHEV analizate pe ciclul WLTC clasa 3b.

Tabelul 8.4: Indicatori energetici comparativi pentru arhitecturile MHEV

Parametru	Unitate	P0	P1	P2
consum combustibil brut	l/100 km	4.801	4.350	3.807
consum combustibil charge-sustaining	l/100 km	5.406	4.922	4.334
consum de energie electrică net	kWh/100 km	2.355	3.196	4.211
consum energie electrică din baterie	kWh/100 km	2.636	4.036	5.728
energie electrică regenerată	kWh/100 km	0.280	0.840	1.517
emisii CO_2 brute	g/km	110.89	100.49	87.93
emisii CO_2 charge-sustaining	g/km	124.87	113.71	100.12
putere medie motor termic	kW	5.938	5.381	4.708
putere medie motor electric	kW	0.895	1.148	1.452
putere maximă motor termic	kW	36.129	34.004	29.754
putere maximă motor electric	kW	6.376	14.031	14.031
putere maximă regenerare	kW	2.774	8.000	8.000
timp funcționare ICE	%	63.35	54.97	54.97
timp rulare EV	%	0.00	8.38	8.38
timp mod hibrid (ICE + EM)	%	63.35	54.97	54.97
timp regenerare	%	23.54	23.60	23.60
SoC final	%	20.76	22.91	25.78
SoC minim	%	20.00	20.00	20.00

În ceea ce privește analiza comparativă procentuală dintre configurații diferențele dintre arhitecturi sunt evidențiate sintetic în Tabelul 8.5.

Tabelul 8.2: Indicatori energetici comparativi pentru arhitecturile MHEV

Parametru	P1 vs P0 [%]	P2 vs P0 [%]
consum combustibil brut	-9.40	-20.70
consum combustibil charge-sustaining	-8.96	-19.83
consum electric net	+35.71	+78.81
consum electric din baterie	+53.11	+117.30
energie electrică regenerată	+200.00	+441.79
emisii CO_2 brute	-9.38	-20.71
emisii CO_2 charge-sustaining	-8.94	-19.82
putere medie motor termic	-9.38	-20.71
putere medie motor electric	+28.27	+62.23
putere maximă motor termic	-5.88	-17.65
putere maximă motor electric	+120.02	+120.02
putere maximă regenerare	+188.38	+188.38
timp funcționare ICE	-13.23	-13.23
timp rulare EV	—	—
timp regenerare	+0.25	+0.25
SoC final	+10.35	+24.18

Analiza globală arată că arhitectura P2 conduce la cea mai mare reducere a consumului charge-sustaining, de aproximativ 20% față de P0, în timp ce arhitectura P1 produce o reducere intermediară, de aproximativ 9%. Acest rezultat demonstrează că apropierea motorului electric de transmisie și creșterea nivelului de integrare electrică permit o valorificare energetică superioară a sistemului hibrid. În paralel, consumul de energie electrică crește cu până la 78%, iar energia regenerată cu peste 400% în cazul configurației P2.

Aceste rezultate confirmă faptul că poziționarea motorului electric mai aproape de transmisie conduce la o valorificare superioară a energiei disponibile și la o reducere semnificativă a dependenței de motorul termic.

Distribuția puterii între motorul termic (ICE) și motorul electric (ME), prezentată în Figura 8.1, evidențiază mecanismul energetic prin care arhitectura sistemului de propulsie influențează consumul total.

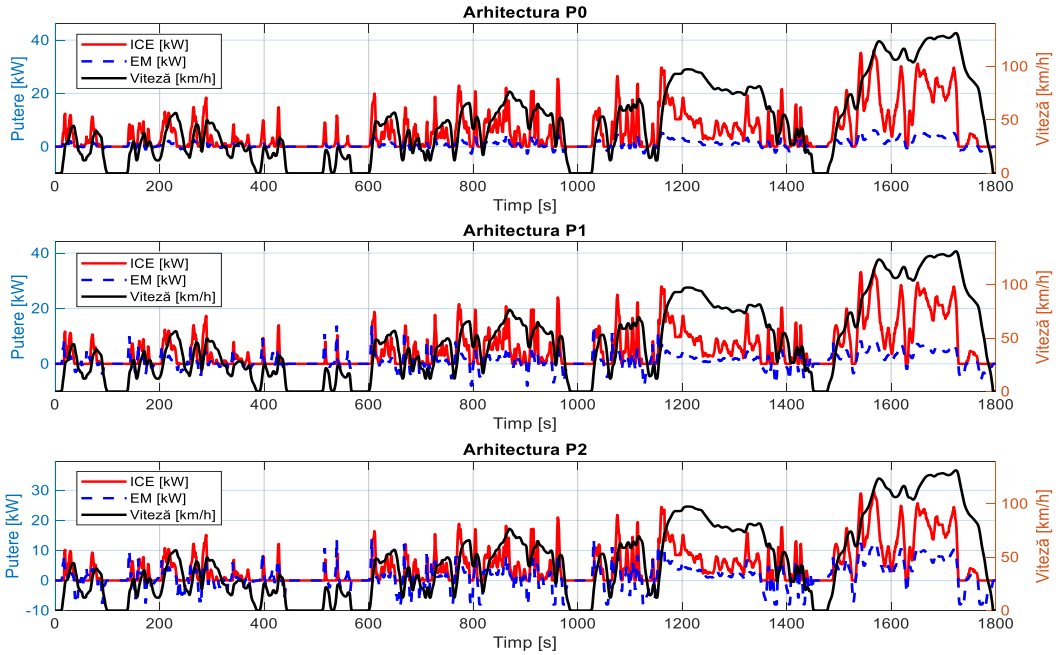


Figura 8.1. Distribuția temporală a puterii între motorul termic și motorul electric pentru arhitecturile P0, P1 și P2 în ciclul WLTC 3b

Deși profilul de viteză și cerința totală de putere la roată sunt identice pentru toate configurațiile, diferențele apar exclusiv din modul de repartizare a acestei puteri între cele două surse.

Evoluția consumului instantaneu, prezentată în Figura 8.2, evidențiază modul în care arhitectura sistemului de propulsie influențează distribuția temporală a consumului energetic, nu doar valorile medii.

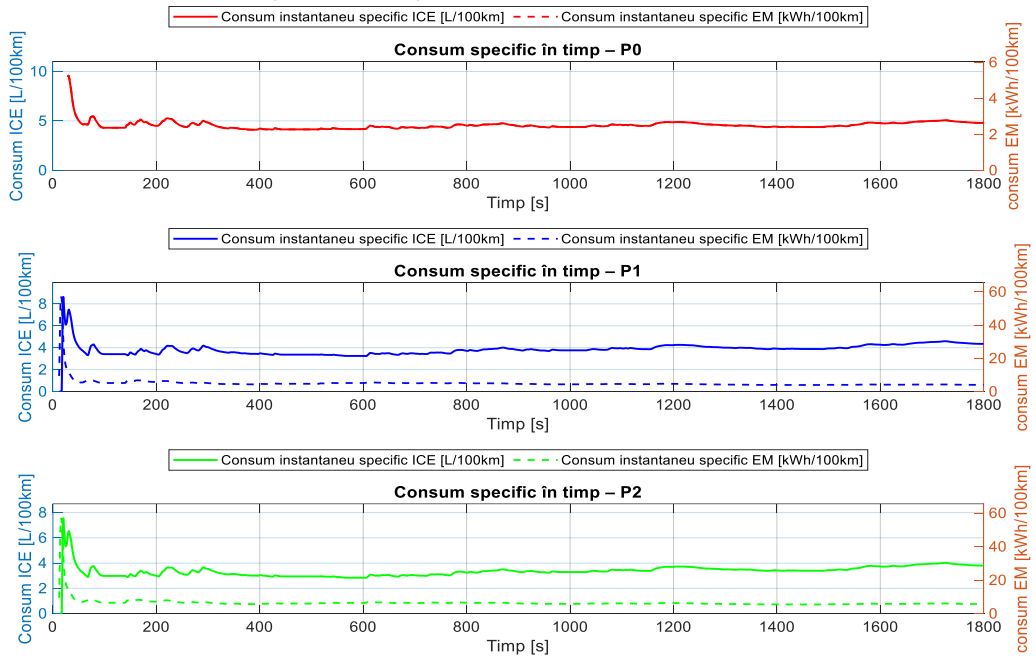


Figura 8.2. Evoluția consumului energetic instantaneu (combustibil și electric) pentru arhitecturile P0, P1 și P2 în ciclul WLTC 3b

Se observă că, pentru același profil de viteză, diferențele dintre arhitecturi apar în special în regimurile de sarcină redusă și în fazele tranzitorii, unde strategia de utilizare a motorului electric devine determinantă.

Rezultatele demonstrează că reducerea consumului de combustibil nu este uniform distribuită pe ciclul de rulare, ci este concentrată în zone de putere redusă, faze de accelerație ușoară și regimuri stop-and-go.

Evoluția energiei electrice cumulative, prezentată în Figura 8.3, evidențiază modul în care arhitectura sistemului de propulsie influențează atât consumul de energie din baterie, cât și capacitatea de recuperare a energiei în fazele de frânare.

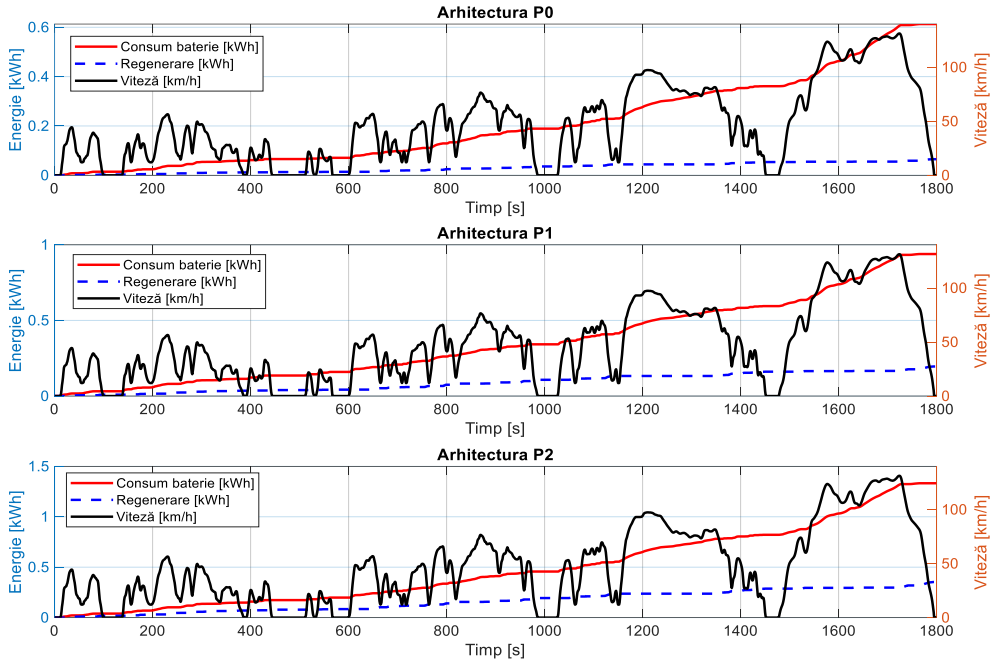


Figura 8.3. Bilanțul energetic electric (consum vs regenerare) în funcție de arhitectura MHEV

Pentru același profil de viteză, diferențele dintre configurații nu sunt determinate de cerința energetică totală, ci de eficiența cu care energia disponibilă în sistem este reutilizată.

Rezultatele arată că reducerea consumului de combustibil nu este determinată doar de asistarea electrică, ci în mare măsură de capacitatea de recuperare a energiei. Astfel, performanța energetică a unui sistem hibrid nu este determinată exclusiv de nivelul de electrificare, ci de eficiența conversiei bidirecționale a energiei (propulsie–regenerare), dependentă direct de arhitectura sistemului de propulsie.

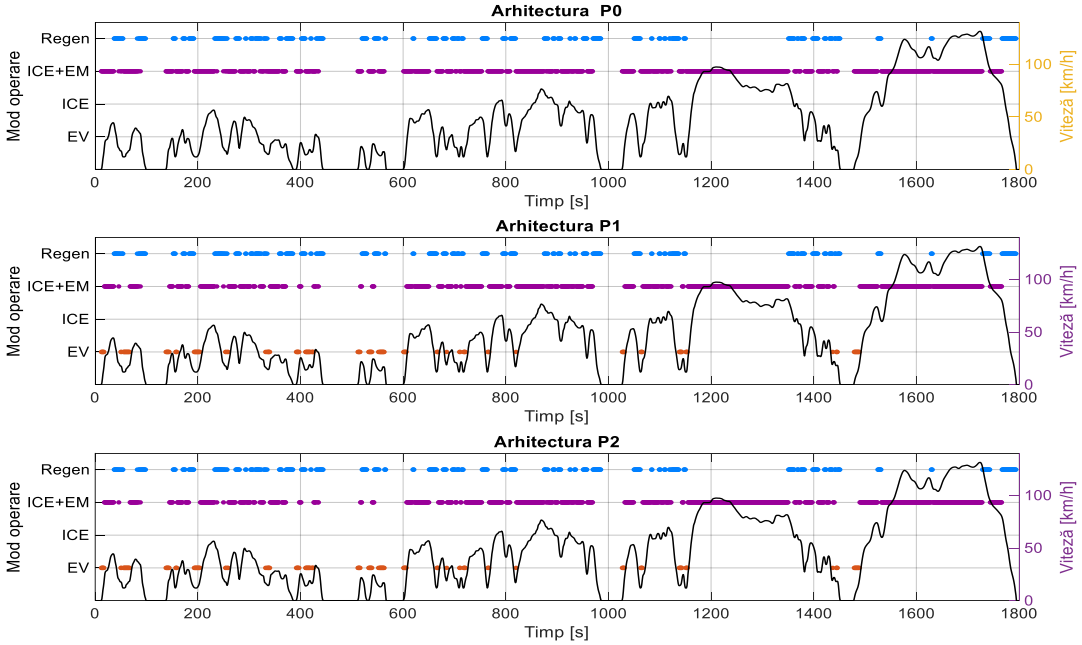


Figura 8.4. Repartizarea temporală a modurilor de operare în funcție de arhitectura sistemului de propulsie

Distribuția modurilor de operare din Figura 8.4 evidențiază modul în care arhitectura sistemului de propulsie determină strategia energetică de utilizare a motorului termic și a motorului electric.

Distribuția temporală a modurilor de funcționare arată că arhitectura P0 funcționează predominant în regim termic, în timp ce P1 și P2 permit rulare electrică și operare hibridă.

Pentru același profil de viteză, diferențele dintre configurații nu sunt generate de cerința de putere, ci de capacitatea fiecărei arhitecturi de a activa diferite moduri de operare

În cazul arhitecturilor P1 și P2, apar secvențe de rulare electrică, în special la viteze reduse, precum și o utilizare mai frecventă a modului hibrid. De asemenea, regimul de regenerare este mai bine exploatat în aceste configurații.

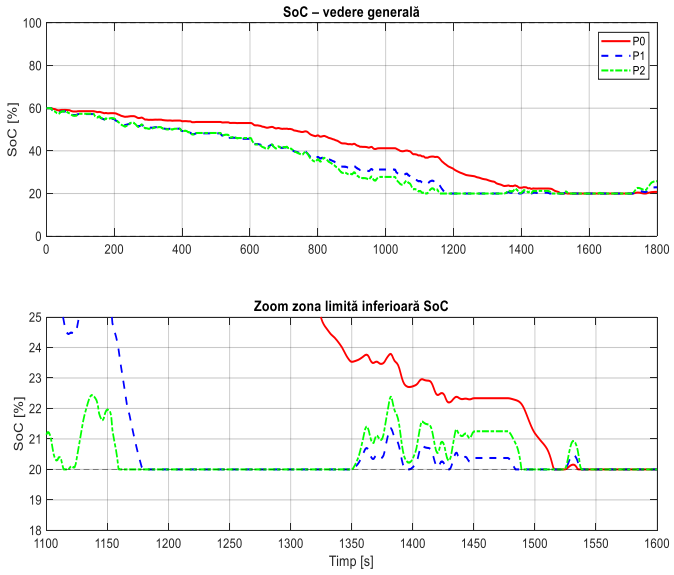


Figura 8.5. Evoluția stării de încărcare a bateriei (SoC) pentru arhitecturile P0, P1 și P2 în ciclul WLTC 3b

Se observă că, pentru toate configurațiile, SoC scade progresiv, ceea ce reflectă utilizarea energiei electrice pentru asistarea propulsiei. Cu toate acestea, diferențele dintre configurații devin evidente prin valorile finale ale SoC și prin amplitudinea variațiilor pe durata ciclului de rulare.

Rezultatele evidențiază faptul că evoluția SoC reflectă direct gradul de electrificare efectivă a sistemului, raportul dintre energia consumată și cea recuperată și strategia de utilizare a motorului electric.

Cu cât arhitectura permite o utilizare mai intensă a motorului electric,cu atât SoC devine un indicator direct al transferului energetic dinspre combustibil către electric.

Menținerea SoC în intervalul 20–80% nu este doar o condiție de validare, ci introduce o constrângere fizică reală asupra sistemului care limitează energia disponibilă pentru asistare, limitează capacitatea de regenerare și impune funcționarea în regim charge-sustaining.

Diferențele de evoluție a SoC explică direct creșterea consumului electric din Tabelul 8.4, diferența dintre consumul brut și cel charge-sustaining și necesitatea conversiei energiei electrice în echivalent combustibil.

Analiza realizată a demonstrat că poziționarea motorului electric în cadrul arhitecturii MHEV reprezintă un factor determinant în stabilirea performanței energetice a sistemului de propulsie. Prin utilizarea unui model unitar și a unei strategii de control identice pentru toate configurațiile analizate, diferențele obținute pot fi atribuite exclusiv arhitecturii sistemului.

Rezultatele au evidențiat o reducere semnificativă a consumului de combustibil, de până la aproximativ 20% în cazul configurației P2, concomitent cu o creștere a utilizării energiei electrice și a capacității de regenerare. Această evoluție reflectă o redistribuire progresivă a sarcinii energetice de la motorul termic către motorul electric, determinată de nivelul de integrare al acestuia în lanțul cinematic.

De asemenea, s-a demonstrat că eficiența globală a sistemului este influențată nu doar de arhitectură, ci și de limitările sistemului de stocare a energiei, în special prin restricțiile impuse asupra puterii de regenerare. Introducerea corecției de tip charge-sustaining a permis obținerea unor rezultate realiste din punct de vedere energetic, evidențiind importanța unui bilanț energetic complet în evaluarea sistemelor hibride.

În ansamblu, rezultatele confirmă că arhitectura sistemului de propulsie reprezintă un parametru de proiectare important, cu impact direct asupra consumului energetic, iar creșterea gradului de electrificare conduce la îmbunătățiri semnificative ale eficienței, în condițiile unor compromisuri legate de complexitate și utilizarea energiei electrice.

În acest context, pentru o analiză mai profundă a influenței motorului electrice asupra performanțelor energetice, studiul este extins în continuare în subcapitolul 8.2 către autovehiculele electrice, unde motorul electric devine sursa principală de propulsie. Astfel, analiza se deplasează de la nivelul arhitecturii sistemului la nivelul construcției mașinii electrice, fiind investigată influența tipului de rotor asupra eficienței și consumului energetic

8.2. Analiza influenței arhitecturii motorului electric asupra consumului energetic al autovehiculului electric

În continuarea analizei la nivel de sistem de propulsie, studiul a fost extins la nivelul motorului electric de tracțiune, prin investigarea influenței arhitecturii acestuia asupra consumului energetic al autovehiculului electric [141].Studiul realizează o analiză comparativă între două configurații de rotor pentru motoare PMSM, definite în condiții identice de alimentare și aceleași constrângeri geometrice și limite termice. Această abordare permite izolarea influenței topologiei rotorului și atribuirea directă a diferențelor de performanță caracteristicilor constructive ale acestuia. În plus, integrarea frânării regenerative permite evaluarea interacțiunii dintre eficiența în regim de tracțiune și capacitatea de recuperare a energiei.

Pe lângă implicațiile asupra performanței energetice a autovehiculului, arhitectura motorului electric are implicații directe asupra sustenabilității. Utilizarea magneților permanenți pe bază de pământuri rare

implică costuri ridicate și vulnerabilități în lanțul de aprovizionare. Motiv pentru care un obiectiv în analiza impactului arhitecturii rotorului a fost optimizarea configurației rotorului astfel încât să se reducă dependența de magneții din pământuri rare.

Autovehiculul electric analizat este configurat într-o arhitectură de tip tracțiune față, cu un singur motor electric de tracțiune, configurație reprezentativă pentru autovehiculele electrice din clasa compactă C, configurație larg utilizată în aplicațiile actuale datorită simplității constructive, eficienței ridicate și fiabilității.

Sistemul de propulsie (Figura 8.8) este alcătuit din patru componente principale: bateria de tracțiune (litiu-ion), invertorul de putere, motorul electric sincron cu magneți permanenți (PMSM) și transmisia mecanică cu raport fix.

Motorul electric este montat pe puntea față și este cuplat mecanic la roțile motoare prin intermediul unei transmisii cu raport fix i_0, de tip mono-treptă și al unui diferențial mecanic. În regim de tracțiune, energia electrică stocată în baterie este convertită în energie mecanică de către invertor și motorul electric, fiind ulterior transmisă la roți prin transmisia mecanică.

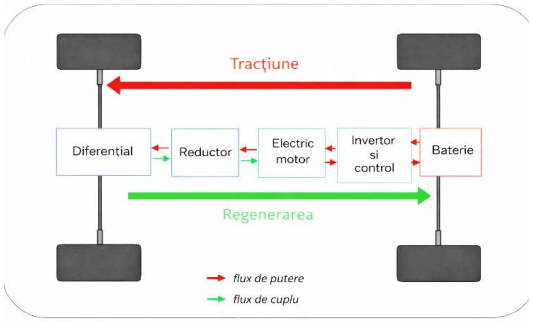


Figura 8.8 Structura reprezentativă a sistemului de propulsie BEV

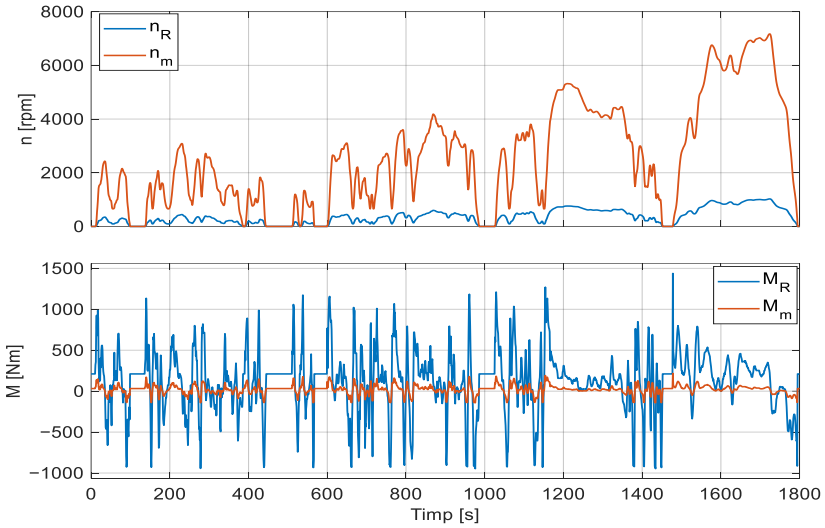


Figura 8.10 Evoluția în timp a turației și a cuplului la roată și la motor pe ciclul WLTP

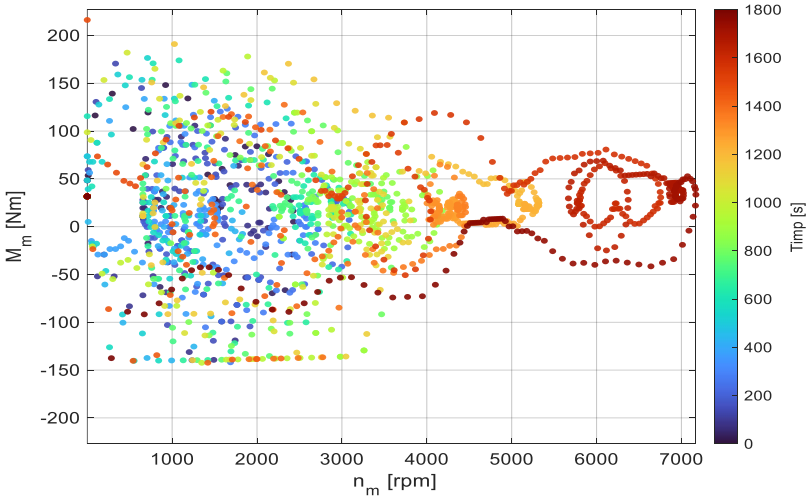


Figura 8.11 Distribuția punctelor de funcționare ale motorului în planul (n_m, M_m) pe ciclul WLTC 3b

Aceste relații asigură maparea coerentă a ciclului WLTP din domeniul vitezei autovehiculului în domeniul de funcționare cuplu–turație al motorului electric. Evoluția în timp a acestor mărimi este ilustrată în Figura 8.10, confirmând consistența conversiei dinamice și cinematice adoptate.

Totodată, aceste transformări au permis maparea directă a cerințelor dinamice specifice ciclului WLTC 3b în planul de funcționare al motorului conform Figurii 8.11.

Distribuția punctelor de funcționare evidențiază nu doar regimurile de operare ale motorului, ci și mecanismul prin care arhitectura acestuia influențează consumul energetic al autovehiculului. Din această perspectivă, analiza nu se limitează la caracterizarea domeniului de funcționare, ci urmărește identificarea zonelor dominante energetic și a implicațiilor acestora asupra eficienței globale.

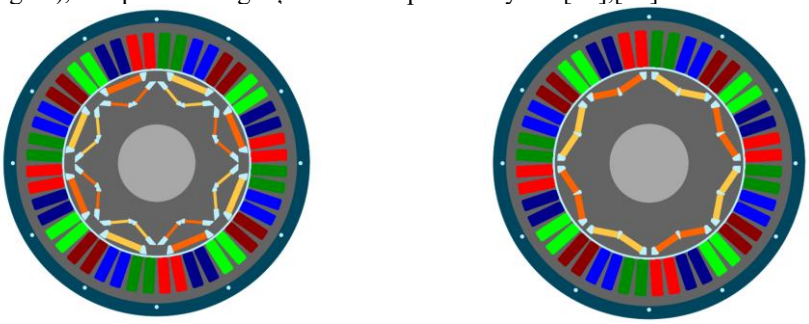
Analiza evidențiază faptul că performanța energetică a motorului electric este determinată în principal de eficiența în domeniul de sarcină parțială și turații medii, unde se concentrează majoritatea punctelor de funcționare, și nu de valorile maxime de cuplu sau randament.

Această distribuție justifică utilizarea unei metodologii bazate pe corelarea punctelor de operare reale cu hărțile de eficiență, deoarece doar această abordare permite evaluarea corectă a influenței arhitecturii motorului asupra consumului energetic al autovehiculului.

Rezultatele obținute demonstrează că optimizarea motorului electric pentru aplicații de tracțiune nu trebuie realizată în raport cu performanțele maxime, ci în raport cu distribuția probabilistică a punctelor de funcționare impuse de ciclurile de conducere.

Pentru satisfacerea cerințelor de cuplu și putere rezultate din modelul dinamic longitudinal al autovehiculului, au fost investigate două configurații de motoare sincrone cu magneți permanenți, notate M1 și M2, proiectate cu obiectivul reducerii masei de magneți permanenți, fără degradarea semnificativă a performanței în planul cuplu–turație.

Ambele configurații de motoare cercetate (Figura 8.12) utilizează rotoare de tip IPM (Interior Permanent Magnet), echipate cu magneți NdFeB dopati cu Dy/Tb [90],[87].



a) b)

Figura 8.12. Configurațiile motoarelor tracțiune PMSM pentru BEV:
a) M1 – rotor IPM cu două straturi; b) M2 – rotor IPM cu un singur strat, în formă de V

Cele două variante analizate utilizează rotoare de tip IPM, însă diferă prin modul de dispunere a magneților permanenți. Configurația M1 (Figura 8.12a) adoptă o structură cu două straturi de magneți, ceea ce favorizează creșterea fluxului în întrefier și obținerea unui cuplu electromagnetic mai ridicat la turații joase și medii. În plus, această topologie oferă o rezervă mai mare față de demagnetizare, însă la costul unei mase mai mari de material magnetic și al unei complexități constructive sporite. Configurația M2 (Figura 8.12b) utilizează un rotor IPM cu un singur strat de magneți în formă de V, soluție orientată către reducerea cantității de NdFeB și creșterea ponderii cuplului de reluctanță. Din punct de vedere conceptual, această arhitectură urmărește obținerea unui compromis între performanță și utilizarea mai eficientă a materialelor active.

Reducerea masei de magneți permanenți cu aproximativ 17,5% față de M1 reprezintă rezultatul tehnologic principal al acestei configurații, însă relevanța sa trebuie analizată în raport cu penalizarea energetică indusă în exploatarea reală.

Evaluarea comparativă a performanței energetice a celor doua motoare M1 și M2 a fost realizată prin proiectarea punctelor de funcționare rezultate din ciclul WLTP asupra hărților de eficiență obținute prin analiză electromagnetică.

Distribuția randamentelor celor doua configurații in punctele punctelor de funcționare specifice profilului de viteză WLTC este prezentata detaliat in anexa A6 iar variația instantanee a eficiențe pentru M1 și M2 pe profilul de viteză reprezentativ este prezentata în Figura 8.15.

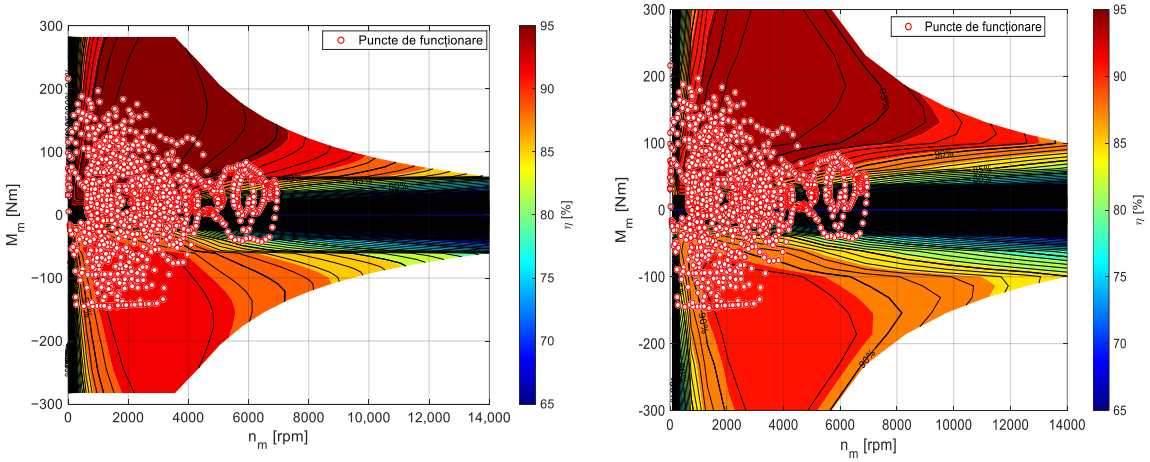


Figura 8.15 Suprapunerea punctelor de funcționare ale motorului de tracțiune peste harta de eficiență a acestuia

Pentru configurația M1, randamentul maxim în regim de tracțiune atinge valori de aproximativ 97.5–97.6%, localizate în regiunea caracterizată de turații medii (≈2000–3000 rpm) și cupluri moderate (≈100–150 Nm), corespunzătoare zonei optime de funcționare a mașinii electrice. În regim de regenerare, valorile maxime sunt ușor inferioare, situându-se în jurul 92.7%, fiind asociate cu niveluri ridicate ale cuplului negativ (≈−150…−100 Nm).

În cazul configurației M2, distribuția spațială a randamentului este similară din punct de vedere topologic, însă valorile maxime sunt sistematic mai reduse. Astfel, în regim de tracțiune se ating aproximativ 97.1–97.2%, iar în regim de regenerare aproximativ 92.3–92.4%, ceea ce indică pierderi energetice suplimentare, deși diferențele în zona optimă rămân relativ reduse.

Din punct de vedere global, analiza distribuției valorilor de randament sugerează un avantaj energetic pentru configurația M1, aceasta prezentând valori medii mai ridicate atât în tracțiune (≈90–91%), cât și în regenerare (≈83%), comparativ cu M2 (≈88–89% în tracțiune și ≈79–80% în regenerare). Această diferență devine relevantă în condițiile exploatării reale, unde funcționarea nu are loc predominant în zona optimă.

Distribuția statistică a punctelor de funcționare indică faptul că regimul dominant de operare este concentrat în zona sarcinilor reduse și medii (0–50 Nm și sub 5000 rpm), unde eficiența este sub valoarea maximă. În aceste condiții, comportamentul la sarcină parțială devine determinant pentru performanța globală a sistemului. Se observă că, în această regiune, configurația M1 menține valori de randament mai ridicate (de exemplu ≈85–87% la 2000–3000 rpm), în timp ce M2 prezintă degradări mai pronunțate (≈80–82%), în special la turații medii și ridicate.

Tabelul 8.3: Indicatori sintetici ai performanței energetice (WLTP)

Indicator	M1	M2	Observații
η_{max} tracțiune [%]	**97.58**	**97.19**	Zonă optimă: 2000-3000 rpm, 100-150 Nm
η_{max} regenerare [%]	**92.71**	**92.38**	Cuplu negativ ridicat (−150 …−100 Nm)
η_{medie} tracțiune [%]	**~90.5**	**~88.8**	M1 superior pe majoritatea domeniului
η_{medie} regenerare [%]	**~83.0**	**~79.5**	Scădere accentuată la cupluri mici(−50 ...0 Nm)
η_{global} WLTP [%]	**~88–89**	**~86–87**	Avantaj clar pentru M1
domeniu optim funcționare	identic	identic	Viteza medie , cuplu mediu (2000–4000 rpm, 50–150 Nm)
sensibilitate la sarcină mică	moderată	ridicată	M2pierde mai mult
performanță la regenerare	bună	mai slabă	diferență clară la cuplu mic

Bilanțul energetic al autovehiculului electric a fost evaluat prin analiza fluxurilor de putere și curent la bornele bateriei, urmată de integrarea în timp a puterii electrice pe durata ciclului WLTC 3b.

Puterea electrică la bornele bateriei este:

$$P_{bat}(t) = U_{bat}(t) \cdot I_{bat}(t) \tag{8.1}$$

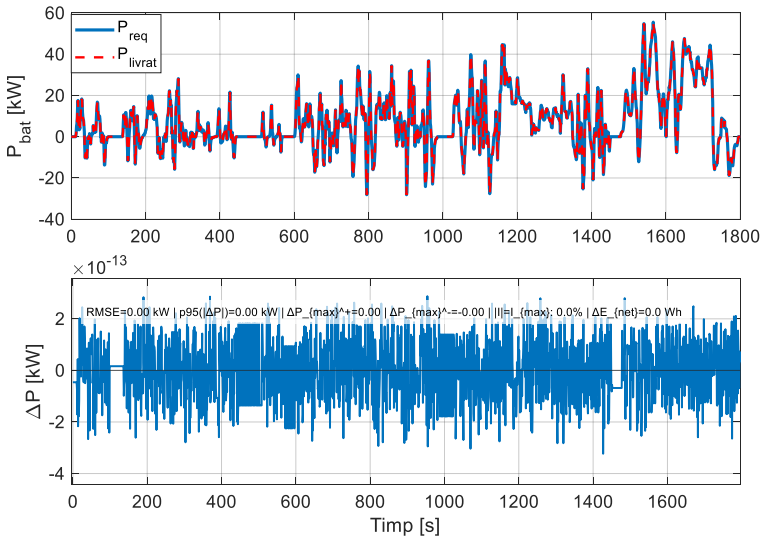
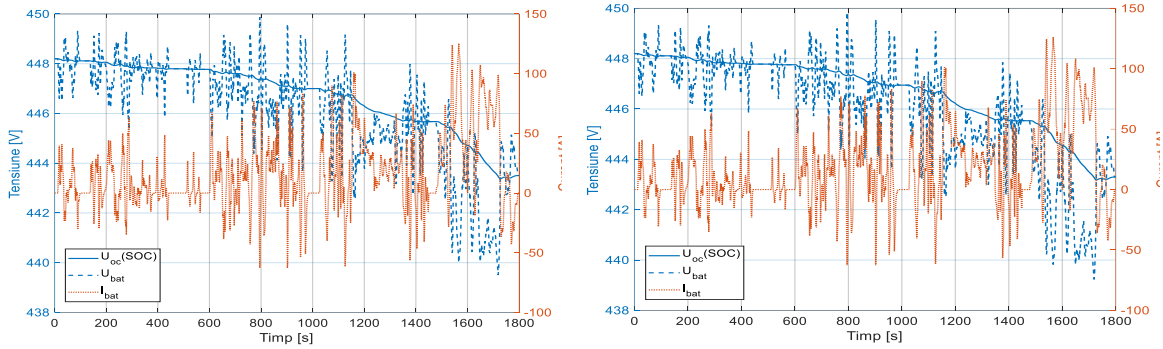


Figura 8.17 Distribuția puterii electrice la bornele sursei de energie a autovehicului

iar distribuția ei in timpul ciclului de conducere, prezentată în figura 8.17, reflectă caracterul puternic tranzitoriu al ciclului WLTC, în care fazele de tracțiune alternează frecvent cu fazele de decelerare și frânare regenerativă. Se observă că majoritatea regimurilor de tracțiune sunt asociate unor cerințe de putere moderate, predominant sub 20 kW, în timp ce valorile de vârf, de ordinul 55–57 kW, apar numai în ferestre scurte de accelerație intensă. Această distribuție confirmă faptul că bilanțul energetic total nu este dominat de valorile maxime de putere, ci de funcționarea preponderentă în regimuri de sarcină parțială, în concordanță cu distribuția punctelor de funcționare analizată anterior.

Distribuția curentului bateriei, prezentată în figura 8.18, confirmă această interpretare. În regim de tracțiune, valorile curentului se situează predominant sub 50 A, iar vârfurile de 125–130 A apar rar și sunt asociate exclusiv fazelor de accelerație intensă. Prin urmare, solicitările electrice maxime există, dar nu guvernează bilanțul energetic mediu al ciclului. Din perspectiva exploatării bateriei, acest rezultat este important deoarece arată că funcționarea dominantă are loc în regimuri moderate de curent, ceea ce limitează atât pierderile ohmice, cât și solicitarea termică a sistemului de stocare.



(M1) **(M2)**

Figura 8.18. Distribuția tensiunii și curentului la bornele bateriei pe profil de viteză

Analiza tensiunii la borne și a căderilor de tensiune în baterie (Figura 8.18) evidențiază o diferență sistematică între cele două variante. Pentru configurația M1, căderea de tensiune este mai redusă în medie și în regimurile severe de funcționare, ceea ce indică o solicitare electrică mai favorabilă a sursei de energie. În cazul configurației M2, valorile mai ridicate ale curentului eficace și ale căderii de tensiune conduc la pierderi ohmice mai mari în baterie. Deși diferențele absolute sunt moderate, acestea devin relevante prin integrare pe întreg ciclul și contribuie la penalizarea energetică globală a variantei M2.Rezultatele arată că varianta M1 necesită o energie totală de tracțiune de 4362 Wh și recuperează 829 Wh, rezultând un consum net extras din baterie de 3533 Wh. În cazul variantei M2, energia totală de tracțiune crește la 4502 Wh, iar energia recuperată scade la 812 Wh, ceea ce conduce la un consum net de 3690 Wh.

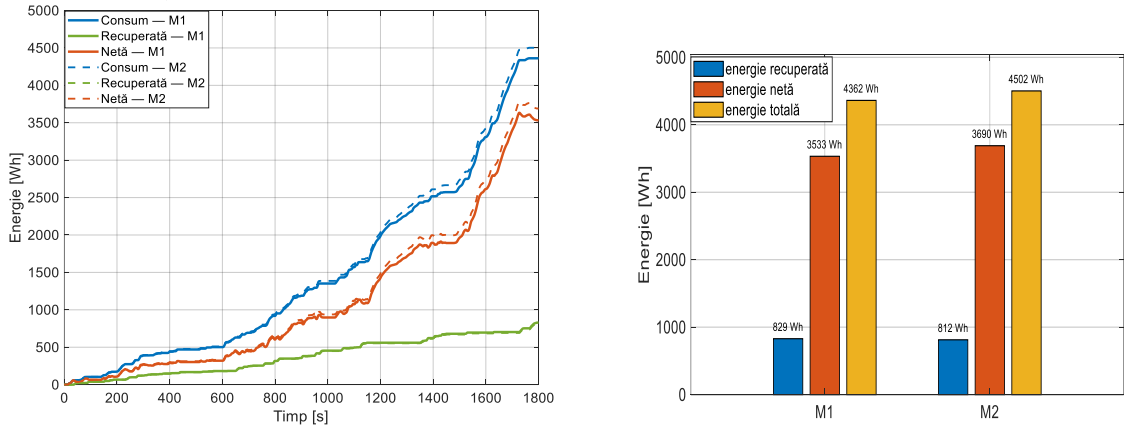


Figura 8.19. Energia consumată din baterie pentru deplasarea BEV pe profil de viteza WLTC 3b

Din punct de vedere al eficienței recuperării, M1 recuperează aproximativ 19% din energia totală de tracțiune, comparativ cu aproximativ 18% pentru M2. Deși diferența procentuală pare redusă, efectul său cumulat este semnificativ, deoarece acționează simultan cu avantajul lui M1 în regim de tracțiune. În consecință, configurația M1 reduce consumul net de energie cu aproximativ 157 Wh față de M2, ceea ce corespunde unei îmbunătățiri energetice de aproximativ 4,25%.

Această diferență se reflectă direct în consumul specific pe ciclul WLTC 3b, prezentat în Figura 8.20. Valorile obținute, de 15,19 kWh/100 km pentru M1 și 15,86 kWh/100 km pentru M2, confirmă competitivitatea ambelor variante pentru segmentul de autovehicule electrice analizat, dar evidențiază în mod clar superioritatea energetică a configurației M1.

Diferența de 0,68 kWh/100 km, corespunzătoare unei reduceri de aproximativ 4,3%, este suficient de mare pentru a deveni relevantă la nivel de autonomie și exploatare reală.

Acest rezultat este deosebit de important deoarece arată că reducerea masei de magneți permanenți poate fi realizată fără afectarea majoră a performanțelor maxime, însă nu fără cost energetic. Configurația M2 oferă un compromis favorabil din punct de vedere constructiv și al utilizării materialelor critice, dar penalizarea energetică asociată este măsurabilă și trebuie luată în considerare în etapa de proiectare.

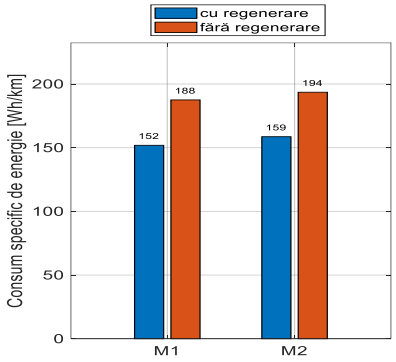


Figura 8.20. Analiza comparativă a consumului specific de energie

În ansamblu, analiza bilanțului energetic demonstrează că influența arhitecturii rotorului asupra consumului specific al autovehiculului se manifestă prin trei mecanisme cumulative:

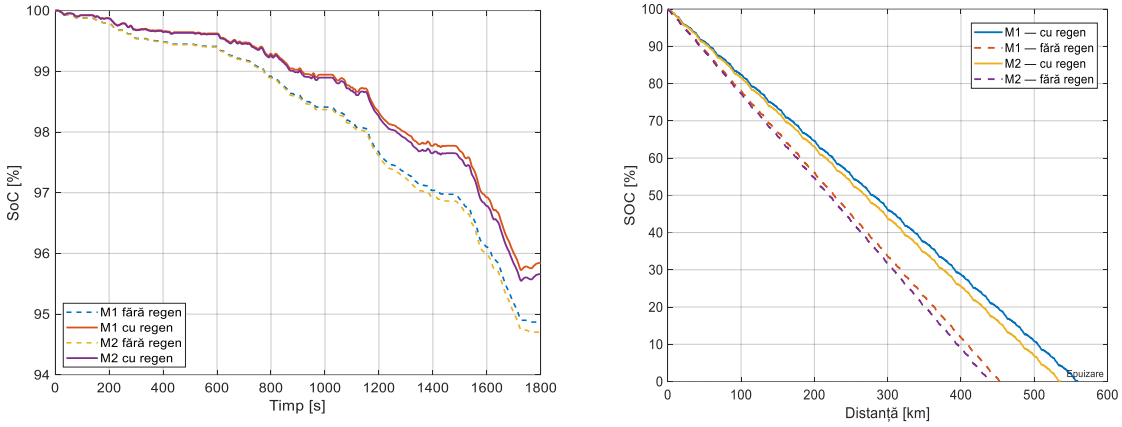
- modificarea eficienței motorului în regimurile dominante de funcționare,
- modificarea eficienței în regim de frânare regenerativă
- schimbarea solicitării electrice a bateriei.

Rezultatele privind autonomia și evoluția stării de încărcare (SoC) oferă o validare directă, la nivel de sistem, a diferențelor energetice identificate anterior între configurațiile de motor electric analizate.

Evoluția SoC pe ciclul WLTP oferă o perspectivă dinamică asupra consumului energetic și asupra modului în care energia este gestionată în timp.

Rezultatele prezentate evidențiază un avantaj sistematic al configurației M1 atât în ceea ce privește autonomia, cât și durata de funcționare a autovehiculului.

În condiții de funcționare cu frânare regenerativă activă, autonomia atinsă este de aproximativ: 559.6 km pentru M1 și 535.9 km pentru M2



a) b)

Figura 8.21. Evoluția stării de încărcare a bateriei autovehiculului BEV
a) pe un ciclu de conducere; b) pana la epuizare

Diferența de aproximativ 23.7 km (~4.4%) este în concordanță directă cu reducerea consumului specific determinată anterior. Această corelație confirmă faptul că diferențele de eficiență la nivelul motorului se propagă coerent până la nivelul indicatorilor globali de performanță ai autovehiculului.

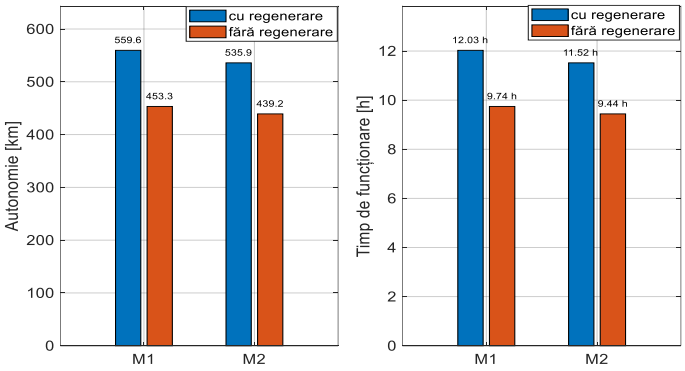


Figura 8.22. Autonomia BEV și distanta parcursă până la epuizarea energiei din baterie

În absența regenerării, autonomia scade semnificativ pentru ambele configurații: 453.3 km (M1) și 439.2 km (M2). Reducerea autonomiei este de aproximativ 19–20%, ceea ce indică faptul că energia recuperată reprezintă o componentă structurală a bilanțului energetic, nu un efect secundar.

Din punct de vedere comparativ avantajul relativ al lui M1 se menține și fără regenerare, ceea ce demonstrează că superioritatea energetică nu este dependentă exclus de regimul generator, ci este determinată în principal de eficiența în tracțiune și la sarcină parțială.

Aceeași tendință este observată și în cazul timpului de funcționare, unde M1 asigură 12.03 h vs 11.52 h (cu regenerare) respectiv 9.74 h vs 9.44 h (fără regenerare).

Rezultatele demonstrează că arhitectura rotorului influențează consumul energetic prin distribuția randamentului în regiunile dominante de funcționare și nu prin modificarea performanțelor maxime. Reducerea masei de magneți permanenți cu 17,5% conduce la o penalizare energetică de aproximativ 4,3% și la o reducere a autonomiei de aproximativ 4,4%, evidențiind compromisul dintre utilizarea materialelor critice și performanța energetică a autovehiculului electric

8.3. Concluzii integrate privind influența arhitecturii sistemului de propulsie asupra consumului energetic

În cazul arhitecturilor mild hybrid, s-a demonstrat că poziționarea motorului electric are un impact direct asupra distribuției puterii și asupra bilanțului energetic. Trecerea de la configurația P0 la P2 conduce la o creștere semnificativă a contribuției motorului electric, la o intensificare a recuperării energiei și la o reducere a solicitării motorului termic. Aceste efecte se traduc printr-o reducere a consumului de combustibil de până la aproximativ 20% și a emisiilor de CO_2, confirmând rolul arhitecturii în eficientizarea sistemelor hibride.

În cazul autovehiculelor electrice, analiza a evidențiat faptul că arhitectura motorului electric influențează consumul energetic nu prin modificarea performanțelor maxime, ci prin modul în care eficiența este distribuită în domeniile de funcționare efectiv utilizate. Corelarea hărților de eficiență cu distribuția punctelor de operare a permis demonstrarea faptului că diferențele aparent reduse la nivel local conduc la variații semnificative ale consumului și autonomiei la nivel de sistem.

Integrarea rezultatelor obținute pentru cele două niveluri de analiză conduce la o concluzie relevantă: performanța energetică a sistemelor de propulsie electrificate este determinată de interacțiunea dintre arhitectura sistemului și caracteristicile componentelor, iar optimizarea trebuie realizată în mod integrat, nu izolat.

Capitolul 9:
CERCETĂRI PRIVIND EVALUAREA INFLUENȚEI MANAGEMENTULUI TERMIC ASUPRA PERFORMANȚEI ENERGETICE ȘI AUTONOMIEI AUTOVEHICULELOR ELECTRICE

Performanța, durabilitatea și siguranța autovehiculelor electrice cu baterii sunt puternic influențate de capacitatea sistemului de management termic de a controla temperaturile componentelor critice ale sistemului de propulsie — bateria, motorul de tracțiune, invertorul și circuitul de răcire — în condiții de funcționare caracterizate prin variații rapide ale sarcinii și ale mediului ambiant.

Literatura de specialitate abordează extensiv componente individuale ale managementului termic al BEV, incluzând răcirea și încălzirea bateriei, modelarea termică a sistemului motor–invertor, funcționarea sistemelor HVAC cu pompă de căldură și strategiile de control ale circuitelor de răcire [119],[31], [33].

Acest decalaj a motivat dezvoltarea și prezentarea în [150] și în cadrul prezentului capitol, a unui cadru unificat de management termic multi-domeniu, bazat pe un model electro-termic de tip rețea RC, capabil să descrie comportamentul tranzitoriu al sistemului de propulsie și interacțiunile termice dintre componentele acestuia.

9.1. Surse de pierderi energetice dependente de temperatură în sistemele de propulsie ale autovehiculelor electrice

În BEV pierderile energetice generate în principalele subsisteme ale lanțului de propulsie - bateria de tracțiune, invertorul de putere și motorul electric - sunt convertite aproape integral în energie termică, care trebuie evacuată controlat pentru menținerea funcționării în limite sigure și eficiente [17],[36],[20]. În absența unui management termic adecvat, acumularea de căldură determină creșterea temperaturilor componentelor critice, ceea ce conduce la scăderea eficienței energetice, limitarea puterii disponibile prin mecanisme de protecție termică (derating) și accelerarea degradării materialelor active și a componentelor electronice [30], [33],[32].

9.2. Strategii integrate de optimizare a managementului termic pentru sistemele de propulsie BEV

În cadrul acestui studiu este propus și implementat un cadru integrat de management termic, care coordonează simultan mai multe mecanisme de control asupra fluxurilor de căldură din sistemul de propulsie motor – invertor – baterie - agent de răcire - HVAC.

Strategiile dezvoltate includ:control predictiv termic bazat pe model (TMPC); recuperarea activă a căldurii reziduale; controlul la viteză variabilă al sistemului de răcire; distribuția termică inteligentă de tip „battery-first” și optimizarea sistemului HVAC și precondiționarea termică.

Aceste strategii nu sunt implementate izolat, ci acționează asupra unor termeni specifici din ecuația de bilanț termic, influențând direct evoluția temperaturilor și distribuția fluxurilor de căldură în rețeaua termică echivalentă.

9.2.1. Control predictiv termic (TMPC)

Controlul predictiv termic reprezintă mecanismul central al cadrului propus, permițând anticiparea evoluției temperaturilor pe un orizont de predicție finit. Funcția de cost este definită ca:

$$J = \sum_{k=1}^{N_p} (J_{aux}(k) + J_{hot}(k) + J_{cold}(k)) \tag{9.1}$$

Aceasta include trei componente iar pentru fiecare combinație, modelul estimează evoluția termică pe orizontul de predicție și calculează costul total asociat consumului auxiliar, supraîncălzirii și subîncălzirii bateriei. Combinația optimă este selectată prin minimizarea funcției de cost.

Această abordare permite realizarea unui echilibru optim între eficiența energetică și siguranța termică, constituind un instrument important pentru managementul termic avansat al sistemelor de propulsie BEV.

9.2.2. Recuperarea activă a căldurii reziduale

Strategia de recuperare valorifică energia termică generată în motor și invertor, care în mod convențional este disipată către mediul ambiant. În consecință, căldura disipată este redirecționată activ către baterie și habitaclu atunci când temperatura bateriei scade sub intervalul optim (20–40°C), reducând astfel sarcina termică asupra sistemului HVAC.

Căldura reziduală totală disponibilă din motor și invertor este determinată ca suma pierderilor instantanee ale acestora:

$$Q_{res} = P_{loss,motor} + P_{loss,inv} \tag{9.2}$$

O fracțiune din această energie termică poate fi recuperată și transferată către baterie:

$$Q_{bat,rec} = \eta_{rec} \cdot Q_{res} \tag{9.3}$$

unde factorul de recuperare η_{rec} depinde de arhitectura termică și de modul de funcționare al chillerului. În condițiile în care bateria este rece ($T_{bat} < T_{opt}$), acest factor este crescut pentru a maximiza transferul util de căldură.

Această energie contribuie la reducerea necesarului de încălzire HVAC, accelerarea încălzirii bateriei în regim rece și îmbunătățirea eficienței globale.

9.2.3. Controlul la viteză variabilă a sistemului de răcire

Spre deosebire de strategiile convenționale de tip ON/OFF, sistemul de răcire funcționează prin modulație continuă a ciclurilor de funcționare (duty-cycle), aplicată pompei de agent de răcire, ventilatorului radiatorului și compresorului chillerului. Puterea pompei este modelată cu o dependență cubică de debit, în timp ce ventilatorul este scalat proporțional cu nivelul de comandă. În plus, sarcina HVAC este calculată separat în funcție de cererea termică a habitaclului și de valoarea curentă a CoP.

Această abordare permite reducerea consumului energetic auxiliar în regimuri de sarcină redusă (de exemplu, rulare la viteză constantă), asigurând în același timp o capacitate ridicată de disipare a căldurii atunci când condițiile de funcționare o impun.

În acest context, algoritmul TMPC determină combinația optimă a ciclurilor de funcționare care minimizează consumul energetic auxiliar, menținând simultan toate componentele în limitele termice admisibile.

9.2.4. Distribuția termică inteligentă

În cadrul strategiei „battery-first", rezistențele termice echivalente dintre fiecare componentă și agentul de răcire sunt modulate activ prin intermediul unui factor scalar de distribuție ρ_B. Asadar, distribuția fluxurilor de căldură este controlată prin modificarea rezistențelor termice echivalente.

Obiectivul de control asociat acestei strategii constă în menținerea temperaturii bateriei în intervalul optim $T_{bat} \in [20,40]°C$, concomitent cu respectarea limitelor termice ale celorlalte componente ($T_{st} < 130°C$, $T_{inv} < 105°C$), în condițiile minimizării consumului energetic auxiliar.

Această dependență permite controlerului predictiv (TMPC) să redistribuie dinamic capacitatea de răcire în favoarea bateriei atunci când acest lucru conduce la îmbunătățirea eficienței globale și a performanței de recuperare a energiei. În mod complementar, prioritatea acordată bateriei este redusă atunci când aceasta operează în intervalul termic optim, iar alte componente se apropie de limitele lor termice.

9.2.5. Optimizarea sistemului HVAC și precondiționarea termică

În cadrul modelului numeric, sistemul HVAC este reprezentat ca o pompă de căldură al cărei coeficient de performanță (COP) variază în funcție de temperatura ambiantă și de temperatura agentului de răcire.

În plus, precondiționarea realizată în regim conectat la rețea asigură aducerea bateriei și a circuitului de răcire în domeniul optim de funcționare încă din faza inițială, reducând astfel cerințele energetice auxiliare în timpul rulării și îmbunătățind performanța electrochimică a bateriei.

9.3. Analiza profilurilor termice tranzitorii rezultate din strategiile de management termic

Pentru a evalua fiabilitatea strategiilor propuse, simulările sunt efectuate pentru patru condiții ambientale distincte: $T_{amb} \in (-10°C, 0°C, 25°C, 40°C)$ acoperind atât regimuri de temperatură scăzută,

caracterizate prin rezistență internă ridicată a bateriei, cât și regimuri de temperatură ridicată, asociate cu risc crescut de supraîncălzire și derating.

Analiza comparativă a profilurilor tranzitorii pentru stator, rotor, invertor și baterie, în condițiile implementării strategiei integrate de management termic, evidențiază faptul că răspunsul termic al sistemului este dominat de interacțiunea dintre trei categorii de factori: nivelul pierderilor interne generate în lanțul de propulsie, capacitatea de evacuare și redistribuire a căldurii prin circuitul de răcire și modul în care strategiile de control prioritizează protecția componentelor critice.

Din graficele obținute pentru se observă că temperatura nu evoluează uniform între componente, ceea ce confirmă faptul că sistemul termic nu este limitat de un singur nod, ci de un ansamblu de surse și căi de transfer termic cu inerții diferite.

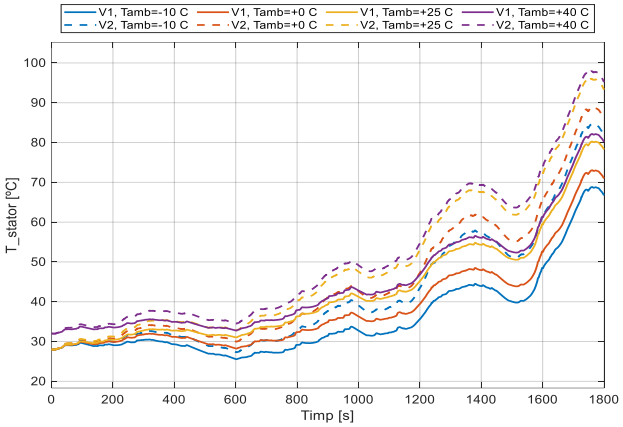


Figura 9.1. Evoluția pierderilor în înfășurări pe durata ciclului WLTC 3b

Diferența dintre cele două variante devine mai pronunțată spre finalul ciclului, ceea ce indică faptul că, în regim dinamic sever, pierderile suplimentare ale variantei M2 nu mai pot fi compensate integral doar prin creșterea capacității de răcire.

Pentru condiția cea mai severă, $T_{amb} = 40°C$, varianta M2 atinge o temperatură maximă a statorului de aproximativ 98℃, comparativ cu $82°C$pentru varianta M1, ceea ce corespunde unei diferențe de $16°C$. Această diferență este susținută de nivelurile superioare ale pierderilor statorice, în special ale componentei Joule, pentru care din tabelul de pierderi (Anexa 9) rezultă valori mai ridicate cu aproximativ 200 W în cazul variantei M2. În consecință, se poate afirma că penalizarea termică a variantei M2 este direct corelată cu creșterea pierderilor electromagnetice interne.

Temperatura rotorului (Figura 9.2) crește mai lent decât cea a statorului și are o variație mai netedă. Acest comportament este explicabil prin două aspecte: rotorul generează o fracțiune mai redusă din pierderile totale și, în plus, are o inerție termică semnificativă, ceea ce îl face să răspundă mai lent la variațiile instantanee ale sarcinii. Diferențele dintre M1 și M2 se păstrează și la acest nivel, însă sunt mai moderate decât la stator sau invertor.

Pentru condiția cea mai severă, $T_{amb} = 40°C$, varianta M2 atinge o temperatură maximă a rotorului de aproximativ $81°C$, comparativ cu $68°C$pentru varianta M1, ceea ce corespunde unei diferențe de $13°C$. Din punct de vedere fizic, rotorul se comportă mai degrabă ca un nod de acumulare termică decât ca un nod critic de disipare instantanee. Căldura sa este influențată atât de pierderile proprii, cât și de schimbul termic cu statorul.

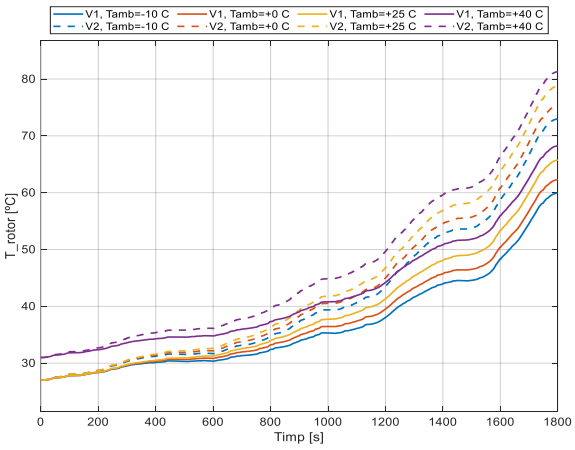


Figura 9.2. Evoluția temperaturilor în rotorul motorului de propulsie BEV

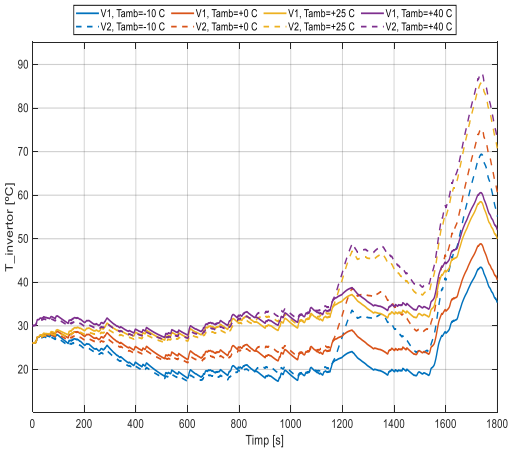


Figura 9.3. Evoluția temperaturi în invertorul sistemului de propulsie

Invertorul este, alături de stator, componenta cea mai critică. Aici efectul strategiilor este foarte clar: TMPC intervine anticipativ pentru a evita intrarea invertorului în zona de derating. În lipsa controlului predictiv, vârfurile din zona finală ar fi mai abrupte și mai apropiate de limitele termice; controlul variabil al răcirii este esențial, deoarece invertorul are nevoie de o reacție rapidă a circuitului de răcire. Modulația debitului

și a puterii ventilatorului permite creșterea temporară a capacității de răcire fără menținerea permanentă a unui consum auxiliar ridicat; distribuția termică inteligentă influențează invertorul prin modularea rezistenței termice efective către agentul de răcire. Atunci când bateria nu solicită o prioritate ridicată, o parte mai mare din potențialul de răcire poate fi folosită pentru controlul invertorului.

Prin urmare, temperatura invertorului reflectă cel mai bine valoarea controlului predictiv: este componenta la care deciziile proactive au cel mai vizibil rol în evitarea suprasolicitării.

Temperatura bateriei (Figura 9.4) rămâne aproape constantă în toate cazurile, cu variații foarte mici pe durata ciclului. Acesta este unul dintre cele mai importante rezultate, deoarece arată că strategia propusă reușește să mențină bateria într-o zonă termică favorabilă, în ciuda diferențelor dintre M1 și M2 și în ciuda variației temperaturii ambientale.

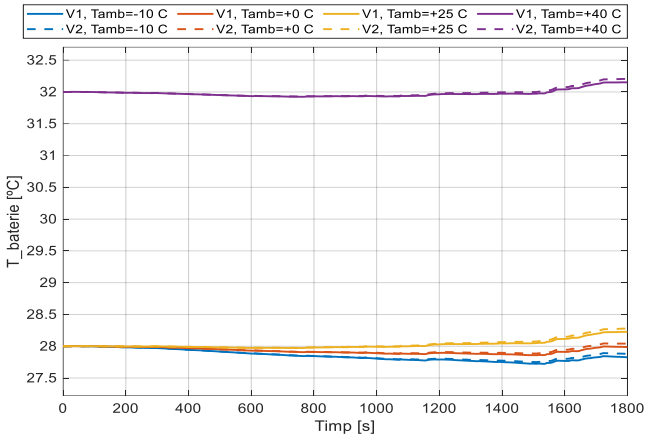


Figura 9.4. Evoluția temperaturii bateriei pe durata ciclului WLTC

În plus, aici contribuie și alte două strategii, respectiv recuperarea căldurii reziduale sprijină menținerea bateriei în zona optimă în condiții reci, reducând riscul subîncălzirii și precondiționarea termică face ca sistemul să pornească deja dintr-o stare favorabilă, astfel încât ciclul WLTP să nu mai înceapă cu o baterie rece sau suprarăcită.

Putem constata că bateria nu mai apare ca nod critic de temperatură, iar managementul termic activ mută problema spre componentele care generează cele mai mari pierderi, adică motorul și invertorul.

În toate graficele, temperaturile cresc odată cu creșterea temperaturii ambientale, ceea ce confirmă sensibilitatea sistemului la condițiile externe. Totuși, creșterea ambientului nu modifică ierarhia componentelor critice: statorul și invertorul rămân dominante, rotorul are un comportament intermediar, iar bateria rămâne bine controlată.

9.3.2. Analiza distribuției pierderilor și a fluxurilor termice

Figura 9.5 prezintă evoluția în timp a principalelor componente de pierderi și fluxuri energetice din lanțul de propulsie, pentru variantele M1 și M2, în funcție de temperatura ambientală.

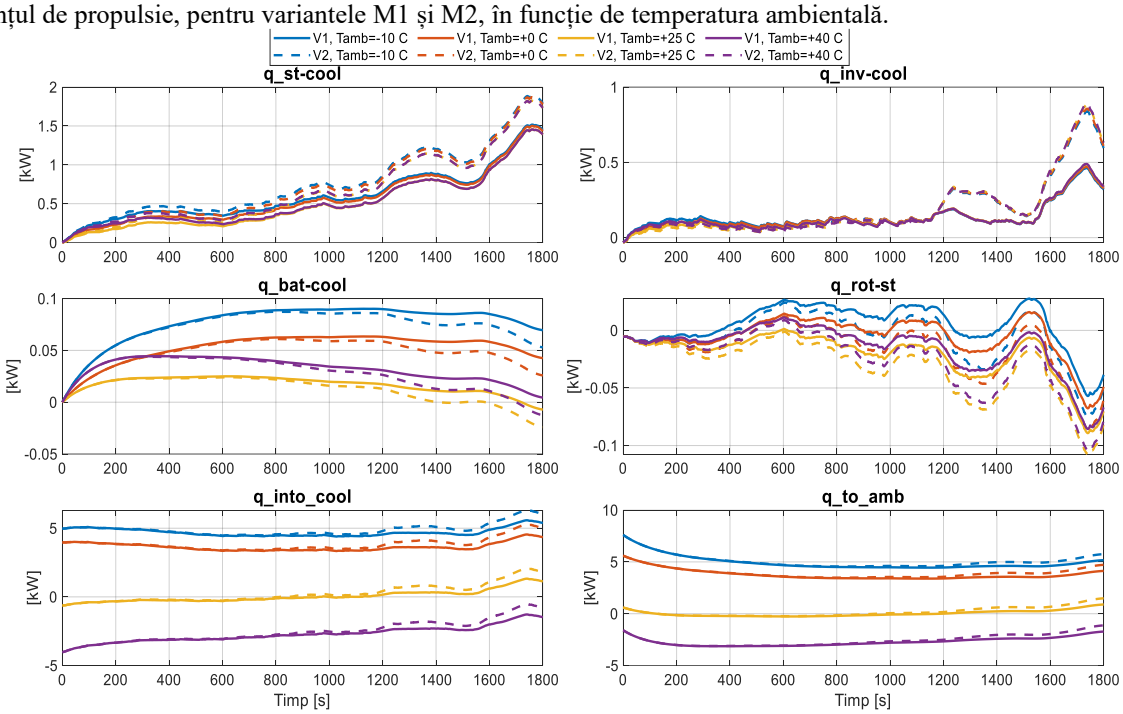


Figura 9.5. Distribuția pierderilor din lanțul de propulsie și a fluxurilor termice

Se observă că strategiile de management nu doar limitează temperaturile, ci reconfigurează distribuția pierderilor în sistem.

Interpretarea acestor rezultate evidențiază faptul că strategiile de management nu acționează exclusiv asupra nivelului temperaturilor, ci determină o redistribuire a pierderilor în interiorul sistemului, influențând direct încărcarea termică a componentelor. Analiza fluxurilor termice pozitive evidențiază acumularea

progresivă de energie termică în sistem. Valorile corespunzătoare variantei M2 sunt mai ridicate pe întreaga durată a ciclului, iar dependența față de temperatura ambientală este clar vizibilă. Acest comportament confirmă faptul că diferențele dintre strategii nu sunt doar instantanee, ci au un caracter cumulativ, determinând o încărcare termică totală mai mare în timp pentru varianta M2.

În ansamblu, se evidențiază un compromis important între performanța energetică și solicitarea termică a sistemului. Varianta M2 permite obținerea unor performanțe energetice superioare, însă cu penalizarea unei încărcări termice mai mari și a unei solicitări crescute a sistemului de răcire. În schimb, varianta M1 prezintă un comportament mai conservativ, caracterizat prin pierderi mai reduse și o stabilitate termică mai bună.

9.4. Analiza impactului strategiilor de optimizare asupra consumului de energie

Figura 9.7 prezintă evoluția în timp a puterii consumate de sistemele auxiliare, respectiv puterea totală auxiliară și componenta asociată sistemului HVAC, pentru variantele M1 și M2, în funcție de temperatura ambientală.Se observă că profilul consumului auxiliar este dominat de cerințele sistemului HVAC, iar variațiile sunt puternic corelate cu temperatura ambientală.

Consumul auxiliar prezintă o tendință descrescătoare în timp, specifică fazei de stabilizare termică a sistemului. La începutul ciclului, valorile sunt ridicate, în special pentru temperaturi ambientale extreme (−10°C și +40°C), după care scad progresiv către un regim cvasi-staționar.

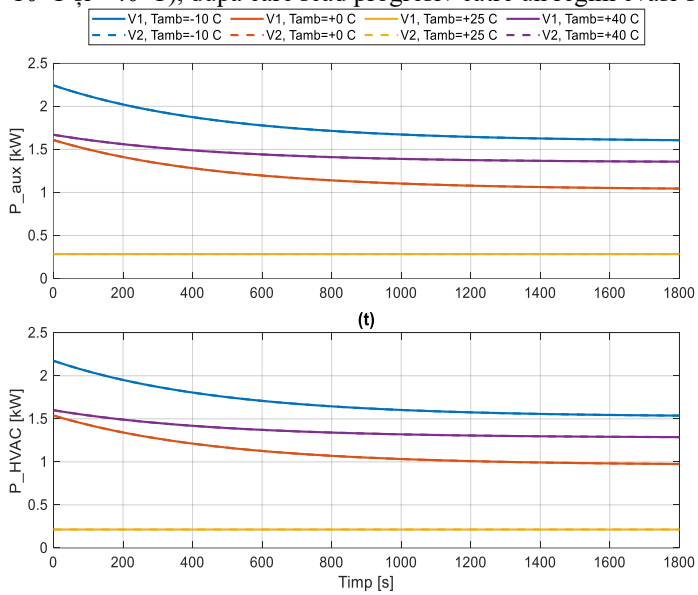


Figura 9.7. Evoluția consumului energetic auxiliar pe profil WLTC comparativ M1vs M2

Analiza comparativă a energiei auxiliare totale și a energiei asociate sistemului HVAC evidențiază faptul că cele două mărimi sunt practic echivalente, ceea ce indică dominanța sistemului de climatizare în cadrul consumului auxiliar. Contribuțiile celorlalte subsisteme auxiliare, precum pompele, unitățile de control electronic sau consumatorii electrici secundari, sunt neglijabile în raport cu cerințele energetice ale HVAC. În consecință, analiza energiei auxiliare poate fi considerată echivalentă, în mod justificat, cu analiza cererii energetice a sistemului de climatizare.

Analiza indicatorilor energetici evidențiază faptul că diferențele dintre strategiile M1 și M2 sunt generate în mod exclusiv de componenta de propulsie, în timp ce consumul auxiliar rămâne invariant pentru aceleași condiții ambientale.

Se observă că, pentru toate temperaturile analizate, strategia M2 conduce la un consum specific total mai ridicat comparativ cu M1, diferența fiind de aproximativ 8 8 Wh/kmA. ceastă creștere este determinată integral de majorarea consumului de propulsie, în timp ce componenta auxiliară (E_{aux} $[Wh/km]$) rămâne identică pentru ambele strategii. Prin urmare, rezultă că strategiile de management energetic nu influențează consumatorii auxiliari, ci exclusiv modul de operare al lanțului de propulsie. Contribuția sistemelor auxiliare la consumul total prezintă o dependență puternică de temperatura ambientală, atingând valori maxime de aproximativ 20% la −10°C și 17% la 40°C, și un minim de aproximativ 4% la 25°C. Această variație confirmă faptul că sistemul HVAC devine un factor energetic dominant în condiții termice extreme, în timp ce la temperaturi moderate influența sa este redusă.

Diferențele dintre strategiile analizate se reflectă direct și în autonomia autovehiculului. Strategia M1 conduce sistematic la valori mai mari ale autonomiei, cu diferențe cuprinse între aproximativ 18 km și 30 km față de M2, în funcție de temperatura ambientală. Această reducere a autonomiei în cazul M2 este consecința directă a consumului energetic crescut în lanțul de propulsie.

Corelând indicatorii energetici cu valorile termice, se observă că strategia M2 determină creșteri semnificative ale temperaturilor componentelor electrice, în special la nivelul invertorului și al motorului electric. De exemplu, temperatura invertorului crește cu peste 20°C în cazul M2 comparativ cu M1, ceea ce indică o creștere a pierderilor interne și a solicitării termice. Această corelație confirmă faptul că diferențele energetice se traduc direct în diferențe termice, evidențiind legătura cauzală dintre consumul de propulsie, pierderile interne și încărcarea termică a sistemului.

În ansamblu, rezultatele arată că strategia M2 favorizează un regim de funcționare mai solicitant energetic și termic, în timp ce strategia M1 asigură un compromis mai favorabil între consum, temperatură și autonomie.

Figura 9.8 sintetizează efectul strategiilor de management termic asupra principalilor indicatori de performanță energetică ai autovehiculului, pentru cele două variante analizate, în funcție de temperatura ambientală. Sunt reprezentate comparativ consumul specific total, energia auxiliară consumată pe ciclul WLTP, energia termică recuperată și autonomia estimată, ceea ce permite o evaluare integrată a compromisului dintre performanța energetică și solicitarea termică a sistemului.

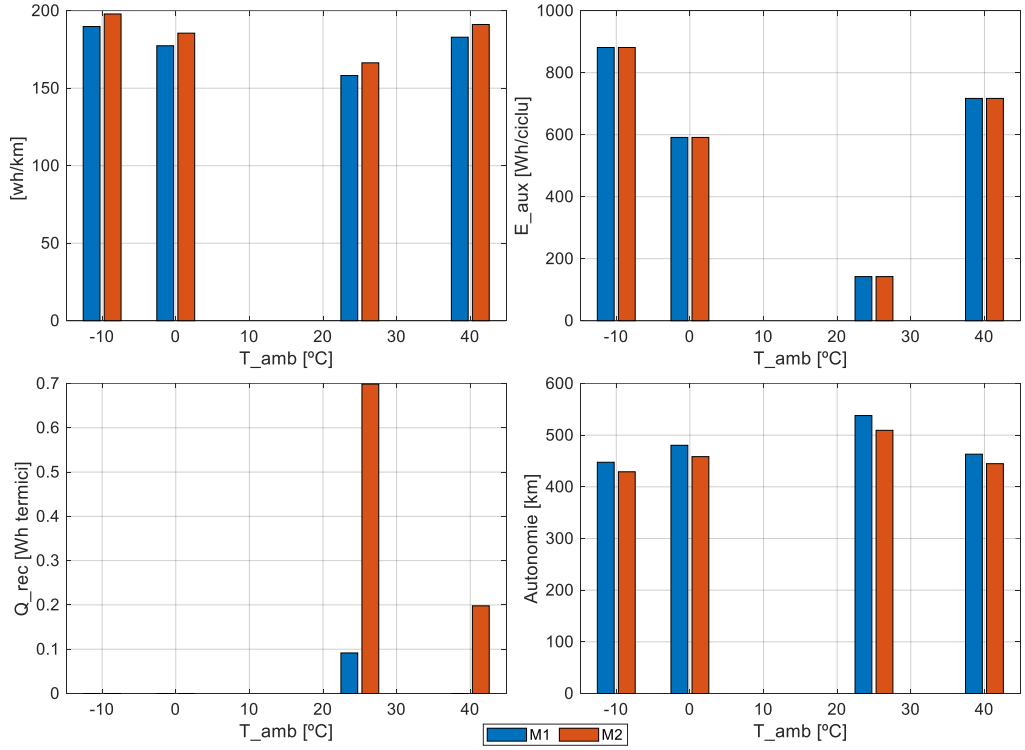


Figura 9.8. Evoluția indicatorilor energetici și termici la variația temperaturii ambientale

Autonomia rezultată reflectă direct toate aceste mecanisme. Se observă că varianta M1 oferă autonomie superioară variantei M2 pentru toate temperaturile analizate, diferența fiind de ordinul zecilor de kilometri. Maximul autonomiei este atins în jurul temperaturii de 25°C, unde consumul auxiliar este minim și condițiile termice sunt cele mai favorabile. La −10°C și la 40°C autonomia scade pentru ambele variante, ca efect direct al creșterii consumului total. Faptul că M2 rămâne inferioară lui M1 chiar și în condițiile în care energia auxiliară este identică pentru ambele variante confirmă că penalizarea de autonomie este determinată de consumul suplimentar de propulsie și de solicitarea termică mai ridicată a componentelor electrice.

Privită în ansamblu, figura evidențiază un rezultat important al studiului: managementul termic nu modifică în mod direct cererea energetică auxiliară între cele două variante constructive, însă influențează performanța globală prin interacțiunea dintre pierderile interne, distribuția termică și regimul de funcționare al componentelor principale ale sistemului de propulsie. Varianta M2 manifestă un potențial ușor superior de recuperare termică în zona optimă de temperatură, dar acest avantaj nu este suficient pentru a compensa creșterea consumului specific total și a solicitării termice. Ca urmare, bilanțul energetic final rămâne mai favorabil pentru varianta M1, care asigură un regim mai eficient și o autonomie mai ridicată pe întreg domeniul de temperatură analizat.

Analiza penalizării autonomiei evidențiază că performanța energetică a autovehiculului este puternic dependentă de condițiile ambientale, cu deviații de până la aproximativ 15–17% față de regimul optim. Temperatura de 25°C reprezintă punctul de funcționare optim, caracterizat prin consum auxiliar minim și eficiență energetică maximă. În condiții de temperatură scăzută sau ridicată, creșterea cerințelor sistemului HVAC și a pierderilor interne conduce la o reducere semnificativă a autonomiei. Deși varianta M2 prezintă o sensibilitate ușor mai redusă la variațiile de temperatură, aceasta rămâne penalizată din punct de vedere al consumului energetic absolut și al autonomiei obținute.

Tabelul 9.2: Penalizarea autonomiei față de condiția optimă (25°C) – comparație M1 vs M2

T_{amb} [°C]	Range **M1** [km]	ΔRange **M1** [km]	ΔRange **M1** [%]	Range **M2** [km]	ΔRange **M2** [km]	ΔRange **M2** [%]
25	537.95	0	0	509.36	0	0
0	480.41	−57.54	−10.70	458.43	−50.93	−10.00

-10	447.58	−90.37	−16.80	429.13	−80.23	−15.76
40	463.19	−74.76	−13.90	444.77	−64.59	−12.68

Penalizarea autonomiei prezintă un comportament similar pentru ambele strategii, fiind maximă la temperaturi scăzute (−10°C), unde scade cu aproximativ 16–17%, și semnificativă și la temperaturi ridicate (40°C), unde se situează în jurul valorii de 13–14%. În condiții apropiate de temperatura optimă (0°C), penalizarea este redusă la aproximativ 10%. Deși valorile absolute ale autonomiei sunt mai mici pentru M2, aceasta prezintă o sensibilitate relativ ușor mai redusă la variațiile de temperatură comparativ cu M1.

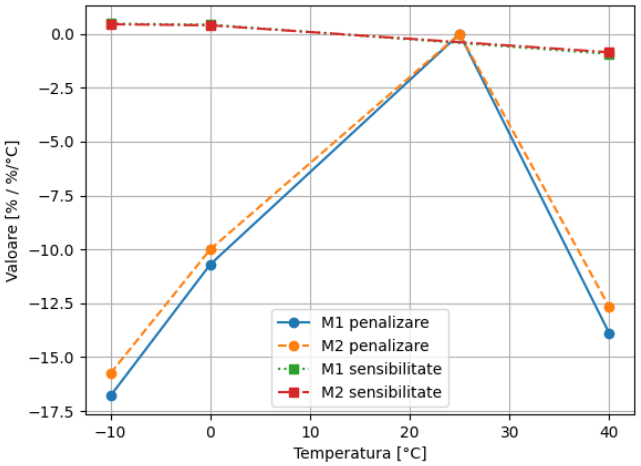


Figura 9.9. Penalizarea și sensibilitatea autonomiei funcție de temperatura ambientală

Sensibilitatea autonomiei la temperatura ambientală evidențiază un comportament asimetric între regimul de temperaturi scăzute și cel de temperaturi ridicate. Pentru temperaturi sub valoarea de referință (25°C), sensibilitatea este relativ moderată, situându-se în intervalul 0.40–0.48 %/°C, ceea ce indică o degradare progresivă a autonomiei pe măsură ce temperatura scade.

În schimb, pentru temperaturi ridicate (40°C), sensibilitatea crește semnificativ în valoare absolută, atingând aproximativ −0.85…−0.93 %/°C, ceea ce indică o penalizare mai accentuată a autonomiei pentru creșterea temperaturii peste regimul optim. Acest comportament reflectă creșterea simultană a consumului auxiliar pentru răcire și a pierderilor interne în componentele electrice.

Comparativ, varianta M2 prezintă o sensibilitate ușor mai redusă decât M1 în toate regimurile analizate, ceea ce indică o dependență relativ mai mică de variațiile de temperatură. Cu toate acestea, acest avantaj este obținut în contextul unui consum energetic absolut mai ridat, ceea ce conduce la o autonomie globală inferioară.

Rezultatele obținute în cadrul acestui capitol evidențiază rolul managementului termic în determinarea performanței energetice și a autonomiei autovehiculelor electrice, demonstrând că acesta nu reprezintă doar un subsistem auxiliar, ci un element central al arhitecturii de propulsie.

CONCLUZII FINALE

În contextul transformărilor accelerate din ingineria autovehiculelor, caracterizate prin electrificare, digitalizare și orientarea către eficiență energetică și sustenabilitate, prezenta teză de doctorat a avut ca obiectiv dezvoltarea unui cadru integrat de analiză a performanței energetice a autovehiculelor electrificate, prin corelarea arhitecturii sistemului de propulsie, a caracteristicilor componentelor, a dinamicii longitudinale și a condițiilor reale de exploatare. Abordarea propusă a urmărit depășirea evaluărilor punctuale, bazate exclusiv pe parametri nominali, prin integrarea modelelor fizice, numerice, electromagnetice și electro-termice într-o structură coerentă de analiză la nivel de sistem.

Rezultatele obținute confirmă faptul că performanța energetică a unui autovehicul electric nu este determinată de un singur subsistem, ci de interacțiunea dintre cererea de tracțiune, randamentul lanțului de conversie, distribuția punctelor de funcționare, constrângerile electrice și termice și condițiile concrete de exploatare. Astfel, consumul energetic și autonomia trebuie interpretate ca rezultate ale unui ansamblu de mecanisme cuplate, în care factorii constructivi, operaționali, comportamentali și ambientali acționează simultan asupra bilanțului energetic.

Analiza teoretică a sistemelor moderne de propulsie a permis evidențierea avantajului fundamental al electrificării din perspectiva eficienței lanțului energetic, dar și a faptului că performanța autovehiculelor electrice rămâne dependentă de modul de gestionare a energiei la nivel de sistem. În acest sens, simpla creștere a capacității bateriei sau a puterii motorului nu garantează optimizarea consumului, dacă punctele reale de funcționare nu sunt corelate cu zonele de randament ridicat ale componentelor.

Modelarea dinamicii longitudinale a demonstrat că cererea energetică a autovehiculului este determinată direct de echilibrul dintre forța de tracțiune și rezistențele la înaintare. Această formulare a permis transformarea profilului de viteză într-un profil de putere, constituind baza pentru evaluarea ulterioară a consumului, autonomiei și solicitărilor asupra sistemului de propulsie. Prin această abordare, dinamica

longitudinală a fost utilizată nu doar ca model mecanic, ci ca element de legătură între mișcarea autovehiculului și bilanțul energetic al sistemului.

Analiza numerică a factorilor de influență a evidențiat rolul diferențiat al principalelor categorii de parametri asupra consumului energetic. Masa echivalentă influențează predominant regimurile tranzitorii, presiunea în anvelope afectează pierderile prin rulare, accelerația determină cererea instantanee de putere, iar sarcinile auxiliare devin relevante în special la viteze reduse și în condiții climatice extreme. Aceste rezultate confirmă caracterul multifactorial al consumului energetic și justifică necesitatea unei abordări integrate în evaluarea autonomiei.

Un rezultat metodologic important îl constituie dezvoltarea procedurii de obținere a hărții de eficiență a motorului electric de tracțiune prin modelare electromagnetică. Această etapă a permis trecerea de la evaluarea motorului prin indicatori punctuali la o caracterizare extinsă în planul cuplu–turație, utilizabilă ulterior în simulări de sistem. Integrarea hărților de eficiență în modelul energetic al autovehiculului a permis corelarea directă dintre punctele reale de funcționare și eficiența instantanee a sistemului de propulsie, ceea ce reprezintă o condiție esențială pentru evaluări realiste ale consumului.

Cercetările privind arhitectura sistemului de propulsie au demonstrat că poziționarea motorului electric în lanțul cinematic al sistemelor MHEV influențează direct distribuția puterii, capacitatea de regenerare și consumul global. Rezultatele au evidențiat că trecerea de la arhitectura P0 la P2 conduce la reducerea consumului de combustibil cu până la aproximativ 20%, în condițiile ipotezelor adoptate și ale ciclului WLTC 3b. În cazul BEV, analiza configurațiilor PMSM a arătat că arhitectura rotorului influențează consumul nu prin modificarea performanțelor maxime, ci prin modul în care eficiența este distribuită în zonele efectiv utilizate ale hărții de funcționare.

Analiza comparativă a celor două configurații de motor electric a evidențiat existența unui compromis între performanța energetică și reducerea utilizării materialelor critice. Reducerea masei de magneți permanenți cu aproximativ 17,5% în configurația M2 este posibilă fără degradarea majoră a performanțelor maxime, însă implică o penalizare energetică măsurabilă în exploatare. Acest rezultat arată că optimizarea mașinii electrice pentru tracțiune nu trebuie realizată exclusiv pe baza performanței electromagnetice locale, ci prin evaluarea impactului asupra consumului și autonomiei la nivel de autovehicul.

Cercetările privind managementul termic au confirmat că acesta nu trebuie tratat ca un subsistem auxiliar, ci ca o componentă funcțională esențială a arhitecturii energetice a autovehiculului electric. Modelul electro-termic dezvoltat a permis evaluarea interacțiunilor dintre pierderile dependente de temperatură, temperaturile componentelor critice, consumul auxiliar și autonomia autovehiculului. Rezultatele au evidențiat că temperaturile extreme conduc la penalizări semnificative ale autonomiei, de ordinul 16–17% la temperaturi scăzute și 13–14% la temperaturi ridicate, iar sensibilitatea autonomiei este mai accentuată în regim de temperatură ridicată.

Analiza integrată a rezultatelor obținute evidențiază că autonomia autovehiculului electric nu este determinată de performanța izolată a unei singure componente, ci de interacțiunea cumulativă dintre eficiența lanțului de propulsie, capacitatea de recuperare energetică și managementul termic al sistemului.

Pentru configurațiile BEV investigate, autonomia estimată fără frânare regenerativă variază între 439.2 km și 453.3 km, în timp ce activarea recuperării energiei la frânare și managementului termic predictiv coordonat conduce la creșteri semnificative, până la 509.36–537.95 km. Prin compararea, se observă pentru condiții reale de exploatare o creștere a autonomiei de 84.65 km pentru configurația M1 și de 70.16 km pentru configurația M2. Aceste valori corespund unor îmbunătățiri relative de aproximativ 18.7%, respectiv 16.0%.

Comparativ, optimizarea arhitecturii motorului electric determină diferențe de autonomie de aproximativ 5,3 % între configurațiile analizate, confirmând influența directă a hărții reale de eficiență asupra consumului energetic global.

În același timp, condițiile termice de exploatare introduc penalizări suplimentare majore: în regimuri ambientale severe (−10°C), autonomia se reduce cu până la 15,8–16,8% față de regimul optim (25°C), evidențiind rolul critic al managementului termic în menținerea performanței energetice iar la temperaturi pozitive extreme autonomia se reduce cu 12,7-13,9%.

În ansamblu, rezultatele tezei demonstrează că optimizarea performanței energetice a autovehiculelor electrificate necesită o abordare sistemică, multi-domeniu, în care dinamica longitudinală, hărțile de eficiență ale motorului, arhitectura sistemului de propulsie, recuperarea energiei și managementul termic sunt tratate integrat. Contribuția principală a lucrării constă în dezvoltarea unui cadru metodologic care permite trecerea de la analiza componentelor individuale la evaluarea performanței energetice globale a autovehiculului în condiții reprezentative de exploatare.

Rezultatele obținute pot constitui suport pentru proiectarea și optimizarea sistemelor de propulsie electrificate, pentru selecția arhitecturilor constructive, pentru evaluarea compromisurilor între eficiență, autonomie și utilizarea materialelor critice, precum și pentru dezvoltarea strategiilor de management energetic și termic aplicabile autovehiculelor electrice moderne.

CONTRIBUȚII ORIGINALE ALE TEZEI

1. **A fost elaborat un cadru integrat de analiză a performanței energetice a autovehiculelor electrificate**, care corelează arhitectura sistemului de propulsie, dinamica longitudinală, caracteristicile electromagnetice ale motorului, consumul auxiliar și managementul termic.
2. **A fost sistematizată analiza arhitecturilor moderne de propulsie** printr-o clasificare multidimensională bazată pe sursa de energie, mecanismul de conversie, arhitectura cinematică, gradul de electrificare și performanța energetică globală.
3. **A fost formulat și utilizat un model dinamic longitudinal al autovehiculului**, capabil să transforme profilul de viteză în cerință de forță, putere și energie, constituind baza pentru simularea consumului energetic în cicluri reprezentative.
4. **A fost definit un set coerent de indicatori energetici, electrici, electromecanici și termici**, utilizabili pentru evaluarea performanței autovehiculelor electrice în regimuri reale de exploatare.
5. **A fost realizată o analiză sistematică a factorilor determinanți ai consumului energetic**, prin separarea factorilor constructivi, operaționali, comportamentali, ambientali și a celor asociați degradării bateriei.
6. **A fost dezvoltată o implementare numerică în MATLAB pentru evaluarea influenței factorilor de consum**, incluzând masa echivalentă, presiunea în anvelope, accelerația, limitarea prin aderență, sarcinile HVAC și stilul de conducere.
7. **A fost demonstrată numeric influența masei echivalente asupra componentei inerțiale a consumului**, rezultatele indicând o creștere de aproximativ 33% a consumului specific inerțial pentru intervalul 1500–2000 kg.
8. **A fost propusă și aplicată o analiză parametrică a influenței masei autovehiculului și presiunii în anvelope asupra consumului asociat rulării**, evidențiindu-se dependența de forma $c_r \sim m/p$ și rolul presiunii ca parametru operațional de optimizare.
9. **A fost dezvoltată o metodologie de obținere a hărții de eficiență a motorului electric de tracțiune**, bazată pe modelare electromagnetică în FluxMotor, caracterizare în plan d–q și validare internă prin puncte reprezentative de funcționare.
10. **A fost demonstrată posibilitatea integrării hărților de eficiență în simulări energetice de sistem BEV**, prin exportul rezultatelor sub formă de tabele de căutare compatibile cu modele longitudinale și strategii de control.
11. **A fost dezvoltat un model comparativ pentru analiza arhitecturilor MHEV P0, P1 și P2**, bazat pe aceleași condiții de exploatare, același ciclu WLTC 3b și aceeași logică de control, permițând izolarea influenței arhitecturii asupra consumului.
12. **A fost cuantificat impactul poziționării motorului electric în arhitecturile MHEV**, demonstrându-se reducerea consumului de combustibil cu până la aproximativ 20% pentru configurația P2 față de P0, în condițiile modelului adoptat.
13. **A fost introdusă o corecție de tip charge-sustaining în analiza sistemelor MHEV**, pentru a evita subestimarea consumului de combustibil prin utilizarea netă a energiei din baterie.
14. **A fost realizată o analiză comparativă la nivel de sistem a două configurații de motor PMSM pentru BEV**, prin integrarea hărților de eficiență în modelul energetic al autovehiculului și evaluarea consumului pe ciclul WLTC 3b.
15. **A fost evidențiat compromisului dintre reducerea masei de magneți permanenți și penalizarea energetică în exploatare**, configurația cu masă redusă de magneți prezentând avantaj constructiv, dar consum specific și autonomie inferioare.
16. **A fost dezvoltat un model electro-termic integrat al sistemului de propulsie BEV**, incluzând pierderile dependente de temperatură în motor, invertor și baterie, modelarea termică de tip rețea RC și mecanismele de derating.
17. **A fost evaluat impactul strategiilor de management termic asupra temperaturilor componentelor critice**, demonstrându-se rolul controlului coordonat în reducerea amplitudinii variațiilor termice și în menținerea funcționării în limite sigure.
18. **A fost analizată influența temperaturii ambientale asupra consumului total și autonomiei**, evidențiindu-se penalizări semnificative ale autonomiei în regimuri termice extreme și comportament asimetric al sensibilității față de temperatura ambientală.
19. **A fost demonstrată interdependența dintre consumul auxiliar, pierderile interne, temperatura componentelor și autonomia autovehiculului**, confirmând necesitatea tratării managementului termic ca parte integrantă a optimizării energetice.

20. **A fost formulată o perspectivă integrată asupra optimizării sistemelor de propulsie electrificate**, în care consumul energetic, recuperarea energiei, arhitectura motorului, constrângerile termice și utilizarea materialelor critice sunt analizate simultan la nivel de autovehicul.

DIRECȚII VIITOARE DE CERCETARE

Rezultatele obținute în cadrul prezentei teze au evidențiat complexitatea proceselor care influențează consumul energetic și autonomia autovehiculelor electrice, precum și necesitatea unei abordări integrate a sistemului de propulsie. Pe baza concluziilor formulate și a limitărilor identificate în cadrul cercetării, se conturează următoarele direcții viitoare de cercetare:

1. Extinderea metodologiei de determinare a hărților de eficiență ale motoarelor electrice de tracțiune prin dezvoltarea unor hărți de eficiență tridimensionale și a unor modele electro-termo-magnetice cuplate, care să integreze influența simultană a turației, cuplului și temperaturii asupra performanțelor electromecanice, permițând descrierea randamentului motorului ca funcție de tipul $\eta = f(n, M, T)$, în vederea creșterii fidelității simulărilor energetice în condiții reale de exploatare;

2. Dezvoltarea unor modele integrate de degradare a bateriei care să coreleze efectele îmbătrânirii calendaristice și ciclice cu regimul termic și condițiile reale de exploatare, permițând evaluarea evoluției autonomiei reale și a performanțelor energetice ale autovehiculului pe întreaga durată de viață a acestuia;

3. Dezvoltarea unor sisteme inteligente de management termic integrat pentru autovehiculele electrice, bazate pe recuperarea căldurii reziduale, utilizarea pompelor de căldură cu control predictiv și coordonarea optimizată a fluxurilor termice între baterie, invertor, motorul electric și sistemul HVAC, în vederea reducerii consumului energetic auxiliar și a creșterii autonomiei în condiții climatice variabile sau extreme;

4. Dezvoltarea unor metode de optimizare multiobiectiv pentru proiectarea simultană a arhitecturii electromagnetice a motorului, a strategiilor de control și a parametrilor transmisiei, cu scopul maximizării eficienței energetice și autonomiei;

5. Dezvoltarea unor strategii de management energetic predictiv bazate pe inteligență artificială și tehnici de învățare automată, capabile să utilizeze informații privind profilul traseului, condițiile de trafic, temperatura ambientală și comportamentul conducătorului auto pentru optimizarea consumului energetic și creșterea autonomiei;

6. Dezvoltarea unui geamăn digital (Digital Twin) al autovehiculului electric, prin integrarea modelelor energetice, electromagnetice și termice dezvoltate în cadrul prezentei cercetări într-o platformă unificată de monitorizare, diagnoză și optimizare, capabilă să reproducă în timp real comportamentul sistemului de propulsie și să permită estimarea consumului energetic și a autonomiei în condiții reale de exploatare;

7. Extinderea metodologiei propuse către configurații avansate de propulsie electrică, precum sistemele dual-motor AWD, arhitecturile e-axle distribuite și autovehiculele electrice comerciale de mare capacitate, pentru investigarea impactului distribuției cuplului, al strategiilor de management energetic și al particularităților ciclurilor de exploatare asupra performanței energetice și autonomiei;

8. Extinderea analizei energetice de la nivelul autovehiculului către nivelul ecosistemului energetic, prin investigarea interacțiunii dintre autovehiculele electrice, infrastructura de încărcare și rețelele inteligente de energie, incluzând strategii de încărcare inteligentă, aplicații Vehicle-to-Grid (V2G) și Vehicle-to-Home (V2H), precum și optimizarea fluxurilor energetice în microrețele, ca o continuare a evaluării energetice de tip Well-to-Wheel abordate în prezenta teză;

9. Validarea experimentală a modelelor energetice, electromagnetice și termice, precum și a strategiilor de control dezvoltate în cadrul prezentei teze, prin implementarea acestora pe platforme experimentale de tip Hardware-in-the-Loop (HIL) și pe autovehicule demonstrative, în vederea evaluării comportării sistemului de propulsie în condiții reale de exploatare. O astfel de abordare ar permite verificarea acurateței modelelor dezvoltate, testarea strategiilor de management energetic și termic și creșterea nivelului de maturitate tehnologică a soluțiilor propuse, facilitând transferul rezultatelor cercetării către aplicații industriale.

Direcțiile de cercetare propuse reprezintă continuări firești ale rezultatelor obținute în cadrul prezentei teze și pot contribui la dezvoltarea unor metode și soluții avansate pentru creșterea performanței energetice, a autonomiei și a sustenabilității sistemelor moderne de propulsie electrică.

Referințe bibliografice

[1] M. Mehdizadeh, "Rethinking electric vehicles in research and planning," *Sustainable Mobility and Transport,* vol. 2, 2025, doi: 10.1038/s44333-025-00067-z.
[2] N. Mostaghis, N. Mirzaei, H. Yousefi, A. Hajinezhad, and M. Abdoos, "Comprehensive bibliometric analysis of electric vehicle research: Trends, emerging topics, and sustainability insights," *Energy Strategy Reviews,* vol. 62, 2025, doi: 10.1016/j.esr.2025.101963.
[3] M. Haghani, "Trends in electric vehicle research: A bibliometric analysis," *Transportation Research Part C,* vol. 153, 2023, doi: 10.1016/j.trc.2023.104188.
[4] A. European Environment, "Transport and environment report 2021," 2022.
[5] A. International Energy, "Global EV Outlook," 2025.
[6] A. F. Pennington and others, "Electric vehicles and health: A scoping review," *Environmental Health Perspectives,* vol. 132, no. 7, 2024, doi: 10.1289/EHP12345.
[7] S. E. Li, L. Wang, and B. Cheng, "Energy management and consumption modeling of electric vehicles: A review," *Applied Energy,* vol. 272, 2020, doi: 10.1016/j.apenergy.2020.115217.
[8] N. Bouter, N. Scarlat, and G. Fontaras, "A comprehensive well-to-wheel assessment of different sport utility vehicle powertrain-fuel combinations in European countries focusing on climate change indicators," *Journal of Cleaner Production,* vol. 541, p. 147412, 2026, doi: 10.1016/j.jclepro.2025.147412.
[9] N. Wang and G. Tang, "A review on environmental efficiency evaluation of new energy vehicles using life cycle analysis," *Sustainability,* vol. 14, no. 6, p. 3371, 2022, doi: 10.3390/su14063371.
[10] T. D. Gillespie, "Fundamentals of Vehicle Dynamics," 1992, doi: 10.4271/R-114.
[11] M. L. de Klerk and A. K. Saha, "A comprehensive review of advanced traction motor control techniques suitable for electric vehicle applications," *IEEE Access,* vol. 9, pp. 125080—125108, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3110736.
[12] R. Wrobel, "A technology overview of thermal management of integrated motor drives -- Electrical machines," *Thermal Science and Engineering Progress,* vol. 29, p. 101222, 2022, doi: 10.1016/j.tsep.2022.101222.
[13] Y. Wang, S. Guo, Y. Cui, and others, "A comprehensive review of machine learning-based state of health estimation for lithium-ion batteries: Data, features, algorithms, and future challenges," *Renewable and Sustainable Energy Reviews,* vol. 209, p. 116125, 2025, doi: 10.1016/j.rser.2025.116125.
[14] A. Kurkin, A. Chivenkov, D. Aleshin, and others, "Battery management system for electric vehicles: Comprehensive review of circuitry configuration and algorithms," *World Electric Vehicle Journal,* vol. 16, no. 8, p. 0451, 2025, doi: 10.3390/wevj16080451.
[15] Tesla, "Model Y Owner's Manual: Specifications," 2023.
[16] J. Dornoff, J. German, A. Deo, and A. Dimaratos, "Mild-hybrid vehicles: A near term technology trend for CO2 emissions reduction," 2022.
[17] A. Emadi, "Advanced Electric Drive Vehicles," 2014, doi: 10.1201/9781315215570.
[18] L. Guzzella and A. Sciarretta, "Vehicle Propulsion Systems," 2013, doi: 10.1007/978-3-642-35913-2.
[19] M. Ehsani, Y. Gao, and A. Emadi, "Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles: Fundamentals, Theory, and Design," 2010, doi: 10.1201/9781420054002.
[20] J. Larminie and J. Lowry, "Electric Vehicle Technology Explained," 2022, doi: 10.1002/9781118361139.
[21] J. Y. Wong, "Theory of Ground Vehicles," 2008, doi: 10.1002/9780470380345.
[22] R. Krishnan, "Permanent Magnet Synchronous and Brushless DC Motor Drives," 2010, doi: 10.1201/9781420014235.
[23] J. Pyrhönen, T. Jokinen, and V. Hrabovcová, "Design of Rotating Electrical Machines," 2013, doi: 10.1002/9781118701591.
[24] M. Gobbi, A. Sattar, R. Palazzetti, and G. Mastinu, "Traction motors for electric vehicles: Maximization of mechanical efficiency -- A review," *Applied Energy,* vol. 353, p. 122496, 2024, doi: 10.1016/j.apenergy.2023.122496.
[25] D. S. Cardoso, P. O. Fael, and A. Espírito-Santo, "A review of micro and mild hybrid systems," *Energy Reports,* vol. 6, no. suppl. 1, pp. 385—390, 2020, doi: 10.1016/j.egyr.2019.08.077.
[26] Y. Liu, Y. G. Liao, and M. C. Lai, "Fuel economy improvement and emission reduction of 48 V mild hybrid electric vehicles with P0, P1, and P2 architectures," *Advances in Mechanical Engineering,* vol. 13, no. 10, p. 16878140211036022, 2021, doi: 10.1177/16878140211036022.
[27] C. Zhai, F. Luo, and Y. Liu, "A novel predictive energy management strategy for electric vehicles based on velocity prediction," *IEEE Transactions on Vehicular Technology,* vol. 69, no. 11, pp. 12559—12569, 2020, doi: 10.1109/TVT.2020.3025686.
[28] M. Usman and A. Saxena, "Technical roadmaps of electric motor technology for next generation electric vehicles," *Machines,* vol. 13, no. 2, p. 0156, 2025, doi: 10.3390/machines13020156.
[29] D. Rimpas, S. D. Kaminaris, D. D. Piromalis, and others, "Comparative review of motor technologies for electric vehicles powered by a hybrid energy storage system based on multi-criteria analysis," *Energies,* vol. 16, no. 6, p. 2555, 2023, doi: 10.3390/en16062555.
[30] X. Feng, M. Ouyang, X. Liu, L. Lu, Y. Xia, and X. He, "Thermal runaway mechanism of lithium-ion batteries for electric vehicles: A review," *Energy Storage Materials,* vol. 10, pp. 246—267, 2018, doi: 10.1016/j.ensm.2017.05.013.
[31] D. Solyali and A. H. Akinlabi, "Configuration, design, and optimization of air-cooled battery thermal management system for electric vehicles: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews,* vol. 125, p. 109815, 2020, doi: 10.1016/j.rser.2020.109815.
[32] A. Gharehghani, M. Rabiei, S. Mehranfar, S. Saeedipour, A. Mahmoudzadeh Andwari, and A. García, "Progress in battery thermal management systems technologies for electric vehicles," *Renewable and Sustainable Energy Reviews,* vol. 202, p. 114654, 2024, doi: 10.1016/j.rser.2024.114654.
[33] F. S. Hwang, T. Confrey, C. Reidy, and others, "Review of battery thermal management systems in electric vehicles," *Renewable and Sustainable Energy Reviews,* vol. 192, p. 114171, 2024, doi: 10.1016/j.rser.2023.114171.
[34] D. Liang, Z. Q. Zhu, and A. Dey, "High-fidelity lumped-parameter thermal models for assessing cooling techniques of PMSMs in EV applications," *CES Transactions on Electrical Machines and Systems,* vol. 9, no. 1, pp. 1—14, 2025, doi: 10.30941/CESTEMS.2025.00001.
[35] J. Oluwalana and K. Grzesik, "A systematic review of life cycle assessment of electric vehicles studies: Goals, methodologies, results and uncertainties," *Energies,* vol. 18, no. 22, p. 5867, 2025, doi: 10.3390/en18225867.
[36] I. Husain, "Electric and Hybrid Vehicles: Design Fundamentals," 2021, doi: 10.1201/9780429490927.
[37] J. Ruan, P. D. Walker, and J. Wu, "Development of continuously variable transmission and multi-speed dual-clutch transmission for pure electric vehicle," *Advances in Mechanical Engineering,* vol. 10, no. 2, p. 1687814018758223, 2018, doi: 10.1177/1687814018758223.
[38] A. Pathak, G. Sethuraman, S. Krapf, A. Ongel, and M. Lienkamp, "Exploration of optimal powertrain design using realistic load profiles," *World Electric Vehicle Journal,* vol. 10, no. 3, p. 56, 2019, doi: 10.3390/wevj10030056.
[39] M. Melaika, S. Mamikoglu, and P. Dahlander, "48V mild hybrid architecture types, fuels and power levels needed to achieve 75 g CO2/km," no. 2019-01-0366, 2019, doi: 10.4271/2019-01-0366.
[40] M. Shang, Z. Zhang, C. Yin, and K. Li, "The development of the fuel saving control strategy for 48 V P0 system: Design and experimental investigation," *Advances in Mechanical Engineering,* vol. 16, no. 1, 2024, doi: 10.1177/16878140231222409.

[41] J. G. Hayes and G. A. Goodarzi, "Book review: Electric Powertrain: Energy Systems, Power Electronics and Drives for Hybrid, Electric and Fuel Cell Vehicles (Miller, J.M.) [Book review]," *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine,* vol. 34, no. 2, pp. 46–47, 2019, doi: 10.1109/MAES.2019.180080.
[42] Y. Zou, X. Wei, H. Sun, and X. Hu, "Energy consumption modeling and prediction of electric vehicles: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews,* vol. 81, pp. 1427—1446, 2018, doi: 10.1016/j.rser.2017.05.193.
[43] F. Alanazi, "Electric vehicles: Benefits, challenges, and potential solutions for widespread adaptation," *Applied Sciences,* vol. 13, no. 10, p. 6016, 2023, doi: 10.3390/app13106016.
[44] J. Masri, M. Ismail, and A. Obaid, "Power flow simulation and thermal performance analysis of electric vehicles under standard driving cycles," *Energies,* vol. 18, no. 4, p. 3737, 2025, doi: 10.3390/en18043737.
[45] Hyundai, "IONIQ 5 technology," 2023.
[46] M. A. M. Chris Mi, "Hybrid Electric Vehicles: Principles and Applications with Practical Perspectives," 2017.
[47] A. Davide, *Battery Management Systems for Large Lithium-Ion Battery Packs*. Artech, 2010, p. 1.
[48] J. B. Goodenough and K.-S. Park, "The Li-Ion Rechargeable Battery: A Perspective," *Journal of the American Chemical Society,* vol. 135, no. 4, pp. 1167–1176, 2013/01/30 2013, doi: 10.1021/ja3091438.
[49] A. Manthiram, "A reflection on lithium-ion battery cathode chemistry," *Nature Communications,* vol. 11, 12/01 2020, doi: 10.1038/s41467-020-15355-0.
[50] Y. G. M. Ehsani, S. E. Gay, and A. Emadi,, *Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles*
3rd ed ed. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, , 2018.
[51] G. L. Plett, *Battery Management Systems, Volume I: Battery Modeling; 2015;* . London, UK,: Artech House, 2015, p. p. 343.
[52] A. Burke, "Ultracapacitors: why, how, and where is the technology," *Journal of Power Sources,* vol. 91, no. 1, pp. 37–50, 2000/11/01/ 2000, doi: https://doi.org/10.1016/S0378-7753(00)00485-7.
[53] S. Thangavel, D. Mohanraj, T. Girijaprasanna, S. Raju, C. Dhanamjayulu, and S. M. Muyeen, "A comprehensive review on electric vehicle: Battery management system, charging station, traction motors," *IEEE Access,* vol. 11, pp. 20994—21019, 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3250221.
[54] P. Mei, H. R. Karimi, C. Huang, F. Chen, and S. C. Yang, "Remaining driving range prediction for electric vehicles: Key challenges and outlook," *IET Control Theory \& Applications,* vol. 17, no. 14, pp. 1919—1936, 2023, doi: 10.1049/cth2.12486.
[55] N. Volkswagen, "Technical data of the Volkswagen ID.4," 2021.
[56] N. Hyundai, "2025 IONIQ 5 N specifications, PMSM dual, 448 kW / 478 kW boost, 697 V," 2024.
[57] A. Kia, "2024 Kia EV6 Specifications," 2024.
[58] N. Porsche, "Porsche electric motors Taycan high voltage," 2021.
[59] MarkLines, "Teardown Analysis of Lucid Air," 2023.
[60] B. M. W. G. PressClub, "The first-ever BMW ix-60: Technical specifications," 2021. [Online]. Available: https://www.press.bmwgroup.com/global/article/detail/T0348394EN/the-new-bmw-ix-m60?language=en.
[61] M. Audi, "Premium Platform Electric (PPE) and Audi Q6 e-tron," 2023.
[62] J. Xu, Z. Guo, Z. Xu, X. Zhou, and X. Mei, "A systematic review and comparison of liquid-based cooling systems for lithium-ion batteries," *eTransportation,* vol. 17, p. 100242, 2023, doi: 10.1016/j.etran.2023.100242.
[63] S. Chavan *et al.*, "Thermal runaway and mitigation strategies for electric vehicle lithium-ion batteries using battery cooling approach: A review of the current status and challenges," *Journal of Energy Storage,* vol. 72, p. 108569, 2023, doi: 10.1016/j.est.2023.108569.
[64] I. Automotive Powertrain Technology, "Volkswagen details ID.3 electric drive," 2020.
[65] I. Boldea and L. N. Tutelea, "Electric Machines: Steady State and Performance with MATLAB," 2021, doi: 10.1201/9781003029960.
[66] S. Chowdhury, E. Gurpinar, G. J. Su, and others, "Enabling technologies for compact integrated electric drives for automotive traction applications," pp. 1—8, 2019, doi: 10.1109/ITEC.2019.8790532.
[67] R. Abebe, G. Vakil, G. L. Calzo, and others, "Integrated motor drives: State of the art and future trends," *IET Electric Power Applications,* vol. 10, no. 8, pp. 757—771, 2016, doi: 10.1049/iet-epa.2015.0506.
[68] S. Wu, J. Zhou, X. Zhang, and J. Yu, "Design and research on high power density motor of integrated motor drive system for electric vehicles," *Energies,* vol. 15, no. 10, p. 3542, 2022, doi: 10.3390/en15103542.
[69] S. Karki, S. Phuyal, D. Tuladhar, S. Basnet, and B. P. Shrestha, "Status of pure electric vehicle power train technology and future prospects," *Applied System Innovation,* vol. 3, no. 3, p. 35, 2020, doi: 10.3390/asi3030035.
[70] M. Renault, "All-new Megane E-TECH Electric: Delving into the heart of innovation," 2022.
[71] B. Zhou, Z. Li, H. Wang, Y. Cui, J. Hu, and F. Jiang, "Design and optimization of an electric vehicle powertrain based on an electromechanical efficiency analysis," *Processes,* vol. 13, no. 6, p. 1698, 2025, doi: 10.3390/pr13061698.
[72] H. Hefny, B. S. Yilmaz, D. Al-Ani, R. Z. Haddad, A. Emadi, and B. Bilgin, "Thermal modeling of an interior permanent magnet synchronous motor for an electric vehicle application," pp. 1—6, 2024, doi: 10.1109/ITEC60657.2024.10598920.
[73] A. Electric Has Gone, "Audi e-tron drivetrain motor," 2023.
[74] Z. Yang, F. Shang, I. P. Brown, and M. Krishnamurthy, "Comparative study of interior permanent magnet, induction, and switched reluctance motor drives for EV and HEV applications," *IEEE Transactions on Transportation Electrification,* vol. 1, no. 3, pp. 245––254, 2015, doi: 10.1109/TTE.2015.2470092.
[75] Tesla. *TESLA, Model S*. [Online]. Available: https://www.tesla.com/sites/default/files/tesla-model-s.pdf
[76] Tesla. *Tesla -Model X*. [Online]. Available: https://www.tesla.com/ownersmanual/2015_2020_modelx/en_cn/Owners_Manual.pdf
[77] G. Mercedes-Benz, "Electrification of the product portfolio," 2023.
[78] C. Krings and C. Monissen, "Review and trends in electric traction motors for battery electric and hybrid vehicles," pp. 1807—1813, 2020, doi: 10.1109/ICEM48471.2020.9225368.
[79] D. Drexler, A. Kampker, H. Born, and others, "Advances in electric motors: A review and benchmarking of product design and manufacturing technologies," *e \& i Elektrotechnik und Informationstechnik,* 2025, doi: 10.1007/s00502-025-01331-3.
[80] F. Filippini and N. Bianchi, "Design of an on-axis electrically excited synchronous motor for heavy commercial vehicles," pp. 5185––5192, 2024, doi: 10.1109/ECCE51808.2024.
[81] S. Wang, M. Degano, J. Kang, A. Galassini, and C. Gerada, "A novel Newton-Raphson-based searching method for the MTPA control of PMaSynRM considering magnetic and cross saturation," pp. 1360—1366, 2018, doi: 10.1109/ICELMACH.2018.8506853.
[82] L. Cinti, P. G. Carlet, L. Ortombina, and N. Bianchi, "Impact of rotor excitation current during flux-weakening control of hybrid-excited permanent magnet synchronous motor," *IEEE Transactions on Industry Applications,* vol. 61, no. 1, pp. 313—321, 2024, doi: 10.1109/TIA.2024.3351234.
[83] L. Shao, D. Tavernini, A. Karci, and A. Sorniotti, "Design and optimisation of energy-efficient PM-assisted synchronous reluctance machines for electric vehicles," *IET Electrical Power Applications,* vol. 17, no. 1, pp. 1—14, 2023, doi: 10.1049/elp2.12245.
[84] H. El Hadraoui, M. Zegrari, A. Chebak, O. Laayati, and N. Guennouni, "A multi-criteria analysis and trends of electric motors for electric vehicles," *World Electric Vehicle Journal,* vol. 13, no. 4, p. 65, 2022, doi: 10.3390/wevj13040065.
[85] S. Kermansaravi, S. S. Refaat, M. Trabelsi, and H. Vahedi, "AI-based energy management strategies for electric vehicles: Challenges and future directions," *Energy Reports,* vol. 11, pp. 450—468, 2025, doi: 10.1016/j.egyr.2025.04.053.
[86] S. Jani and J. Jamnani, "Performance validation of PM-assisted SynRM and PMSM with optimized design for EV application," *Transactions on Energy Systems and Engineering Applications,* vol. 4, no. 1, pp. 1—14, 2023, doi: 10.32397/tesea.vol4.n1.1.

[87] L. Di Leonardo, M. Carbonieri, N. Bianchi, and M. Tursini, "Fast mapping procedure for synchronous reluctance motors via magnetic coenergy reconstruction method from boundaries dataset," *IEEE Transactions on Industry Applications,* vol. 61, no. 4, pp. 6160—6171, 2025, doi: 10.1109/TIA.2025.3378942.
[88] G. H. Park, J. H. Kim, J. H. Kim, K. S. Cha, and Y. H. Jung, "Performance comparison between IPMSMs with rare-earth PM and rare-earth-free PM according to driving cycle of electric vehicles," pp. 1—7, 2025, doi: 10.1109/ECCE51809.2025.
[89] E. Agamloh, A. von Jouanne, and A. Yokochi, "An Overview of Electric Machine Trends in Modern Electric Vehicles," *Machines*, vol. 8, no. 2, p. 20doi: 10.3390/machines8020020.
[90] N. Bianchi, L. Cinti, C. Contò, and L. Ortombina, "SPM motor with star-delta winding: Fault analysis and experimental validation," *IEEE Transactions on Industry Applications,* vol. 61, no. 1, pp. 47—55, 2024, doi: 10.1109/TIA.2024.3351234.
[91] W. Cai, X. Wu, M. Zhou, and others, "Review and development of electric motor systems and electric powertrains for new energy vehicles," *Automotive Innovation,* vol. 4, pp. 3—22, 2021, doi: 10.1007/s42154-021-00139-z.
[92] A. M. Prajapati, A. R. Prajapati, and D. M. Mehta, "Advanced control strategies of PMSM for battery electric vehicle application: A review," *Journal of Electrical Systems,* vol. 20, no. 5, pp. 1139—1149, 2024, doi: 10.52783/jes.2345.
[93] J. Lemmens, P. Vanassche, and J. Driesen, "Optimal control of traction motor drives under electrothermal constraints," *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics,* vol. 2, no. 2, pp. 249—263, 2014, doi: 10.1109/JESTPE.2014.2299765.
[94] M. Ibrahim, O. Järg, R. Seppago, and A. Rassõlkin, "Performance optimization of a high-speed permanent magnet synchronous motor drive system for formula electric vehicle application," *Sensors,* vol. 25, no. 9, p. 3156, 2025, doi: 10.3390/s25093156.
[95] H. Aygun, M. Gkdağ, M. Aktaş, and M. Cernat, "A novel sensorless field oriented controller for permanent magnet synchronous motors," pp. 715—720, 2014, doi: 10.1109/ISIE.2014.6864700.
[96] N. T. Anh, C. K. Chen, and X. Liu, "An efficient regenerative braking system for electric vehicles based on a fuzzy control strategy," *Vehicles,* vol. 6, no. 4, pp. 1496—1512, 2024, doi: 10.3390/vehicles6040072.
[97] D. Berjoza, V. Pirs, and I. Jurgena, "Research into the regenerative braking of an electric car in urban driving," *World Electric Vehicle Journal,* vol. 13, no. 11, p. 202, 2022, doi: 10.3390/wevj13110202.
[98] R. K. Chidambaram, D. Chatterjee, B. Barman, and others, "Effect of regenerative braking on battery life," *Energies,* vol. 16, no. 14, p. 5303, 2023, doi: 10.3390/en16145303.
[99] G. Lee, J. Song, J. Han, Y. Lim, and S. Park, "Study on energy consumption characteristics of passenger electric vehicle according to the regenerative braking stages during real-world driving conditions," *Energy,* vol. 283, p. 128745, 2023, doi: 10.1016/j.energy.2023.128745.
[100] C. Li, L. Zhang, S. Lian, and M. Liu, "Research on regenerative braking control of electric vehicles based on game theory optimization," *Science Progress,* vol. 107, no. 1, p. 00368504231222409, 2024, doi: 10.1177/00368504241247404.
[101] J. Valladolid, M. Calle, and A. Guiracocha, "Analysis of regenerative braking efficiency in an electric vehicle through experimental tests," *Ingenius,* no. 29, pp. 24—31, 2023, doi: 10.17163/ings.n29.2023.02.
[102] Y. Gao, X. Xu, M. Li, and H. Ling, "Research on modelling and control strategy of motor thermal management system for pure electric vehicles," pp. 6537—6542, 2024, doi: 10.23919/CCC63176.2024.10662608.
[103] BYD. *BYD ATTO3*. [Online]. Available: https://byd-kristan.com/wp-content/uploads/2022/10/BYD-ATTO-3-Brochure.pdf
[104] Yasa, "Axial Flux Motors Technology," 2024.
[105] E. D. Lupu, S. L. Tabacu, *Analysis of Axial Flux Permanent Magnet Motors Used for Electric Vehicle*,"2024 IEEE International Conference And Exposition On Electric And Power Engineering (EPEi), Iasi, Romania, 2024, pp. 415-420, https://doi.org/10.1109/EPEi63510.2024.10758149 -
[106] X. Yang, B. Kou, J. Luo, Y. Zhou, and F. Xing, "Torque characteristic analysis of a transverse flux motor using a combined-type stator core," *Applied Sciences,* vol. 6, no. 11, p. 342, 2016, doi: 10.3390/app6110342.
[107] S. Kalt, J. Erhard, and M. Lienkamp, "Electric machine design tool for permanent magnet synchronous machines and induction machines," *Machines,* vol. 8, no. 1, p. 15, 2020, doi: 10.3390/machines8010015.
[108] S. A. E. International, "Vehicle power and rated system power test for electrified powertrains," no. J2908_202301, 2023, doi: 10.4271/J2908_202301.
[109] X. Hua and E. Gandee, "Vibration and dynamics analysis of electric vehicle drivetrains," *Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control,* vol. 40, no. 1, p. 146134842097920, 2021, doi: 10.1177/1461348420979201.
[110] S. Tabacu and D. Popa, "Backward-facing analysis for the preliminary estimation of the vehicle fuel consumption," *Sustainability,* vol. 15, no. 6, p. 5344, 2023, doi: 10.3390/su15065344.
[111] S. Tabacu, "Dinamica autovehiculelor," 2003.
[112] I. Preda, "Dinamica autovehiculelor rutiere," 1999.
[113] I. Miri, A. Fotouhi, and N. Ewin, "Electric vehicle energy consumption modelling and estimation---A case study," *International Journal of Energy Research,* vol. 45, no. 1, pp. 501—520, 2021, doi: 10.1002/er.5700.
[114] C. Montaleza, P. Arévalo, M. Tostado-Véliz, and F. Jurado, "Intrinsic characteristics of forward simulation modeling electric vehicle for energy analysis," *Electricity,* vol. 3, no. 2, pp. 202—219, 2022, doi: 10.3390/electricity3020011.
[115] L. F. Crabtree, "Aerodynamics of Road Vehicles: From Fluid Mechanics to Vehicle Engineering. Edited by W-H. Hucho. Butterworth & Company, (Publishers) Limited, London. 1987. 566 pp. Illustrated. £45.00," *The Aeronautical Journal,* vol. 91, no. 906, pp. 285–285, 1987, doi: 10.1017/S0001924000021370.
[116] C. European, "Worldwide Harmonized Light Vehicles Test Procedure (WLTP)," 2017.
[117] S. F. Tie and C. W. Tan, "A review of energy sources and energy management system in electric vehicles," *Renewable and Sustainable Energy Reviews,* vol. 20, pp. 82–102, 2013/04/01/ 2013, doi: https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.11.077.
[118] I. Boldea, *Electric Drives (3rd ed.). CRC Press*. CRC Press, 2016.
[119] M. Lu, X. Zhang, J. Ji, X. Xu, and Y. Zhang, "Research progress on power battery cooling technology for electric vehicles," *Journal of Energy Storage,* vol. 27, pp. 101—155, 2020, doi: 10.1016/j.est.2019.101155.
[120] C. Suresh, A. Awasthi, B. Kumar, S. K. Im, and Y. Jeon, "Advances in battery thermal management for electric vehicles: A comprehensive review of hybrid PCM--metal foam and immersion cooling technologies," *Renewable and Sustainable Energy Reviews,* vol. 208, p. 115021, 2025, doi: 10.1016/j.rser.2024.115021.
[121] R. Wang, H. Zhang, J. Chen, R. Ding, and D. Luo, "Modeling and model predictive control of a battery thermal management system based on thermoelectric cooling for electric vehicles," *Energy Technology,* vol. 12, no. 5, 2024, doi: 10.1002/ente.202301205.
[122] Y. Xie, C. Wang, X. Hu, X. Lin, Y. Zhang, and W. Li, "An MPC-based control strategy for electric vehicle battery cooling considering energy saving and battery lifespan," *IEEE Transactions on Vehicular Technology,* vol. 69, no. 11, pp. 14657—14673, 2020, doi: 10.1109/TVT.2020.3032989.
[123] B. O. Varga, A. Sagoian, and F. Mariasiu, "Prediction of electric vehicle range: A comprehensive review of current issues and challenges," *Energies,* vol. 12, no. 5, p. 946, 2019, doi: 10.3390/en12050946.
[124] R. Skuza and R. S. Jurecki, "Analysis of factors affecting the energy consumption of an EV vehicle---a literature study," *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering,* vol. 1247, p. 012001, 2022, doi: 10.1088/1757-899X/1247/1/012001.
[125] J. Hofer, E. Wilhelm, and W. Schenler, "Comparing the mass, energy, and cost effects of lightweighting in conventional and electric passenger vehicles," *Journal of Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems,* vol. 2, no. 3, pp. 284—295, 2014, doi: 10.13044/j.sdewes.2014.02.0023.
[126] J. Mavlonov, S. Ruzimov, A. Tonoli, A. Amati, and A. Mukhitdinov, "Sensitivity analysis of electric energy consumption in battery electric vehicles with different electric motors," *World Electric Vehicle Journal,* vol. 14, no. 2, p. 36, 2023, doi: 10.3390/wevj14020036.

[127] K. Ramakrishnan, S. Stipetic, M. Gobbi, and G. Mastinu, "Optimal sizing of traction motors using scalable electric machine model," *IEEE Transactions on Transportation Electrification,* vol. 4, no. 1, pp. 314—321, 2018, doi: 10.1109/TTE.2017.2750488.
[128] D. S. Puma-Benavides, J. Izquierdo-Reyes, R. Galluzzi, and J. D. D. Calderon-Najera, "Influence of the final ratio on the consumption of an electric vehicle under conditions of standardized driving cycles," *Applied Sciences,* vol. 11, no. 23, p. 11474, 2021, doi: 10.3390/app112311474.
[129] T. Settey, J. Gnap, F. Synák, T. Skrúcaný, and M. Dočkalik, "Research into the impacts of driving cycles and load weight on the operation of a light commercial electric vehicle," *Sustainability,* vol. 13, no. 24, p. 13872, 2021, doi: 10.3390/su132413872.
[130] J. Thomas, S. Huff, and B. West, "Fuel economy and emissions effects of low tire pressure, open windows, roof top and hitch-mounted cargo, and trailer," *SAE International Journal of Passenger Cars - Mechanical Systems,* vol. 7, no. 2, pp. 862—872, 2014, doi: 10.4271/2014-01-1614.
[131] M. Mruzek, I. Gajdáč, K. Dalibor, and L. Bažala, "Analysis of parameters influencing electric vehicle range," *Procedia Engineering,* vol. 134, pp. 165—174, 2016, doi: 10.1016/j.proeng.2016.01.056.
[132] J. Vetter *et al.*, "Ageing mechanisms in lithium-ion batteries," *Journal of Power Sources,* vol. 147, no. 1, pp. 269–281, 2005/09/09/ 2005, doi: https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2005.01.006.
[133] C. R. Birkl, M. R. Roberts, E. McTurk, P. G. Bruce, and D. A. Howey, "Degradation diagnostics for lithium ion cells," *Journal of Power Sources,* vol. 341, pp. 373–386, 2017/02/15/ 2017, doi: https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2016.12.011.
[134] P. P. Silvester and R. L. Ferrari, "Finite Elements for Electrical Engineers," 1996, doi: 10.1017/CBO9780511529320.
[135] E. Altair, "FluxMotor User Guide -- Performance Mapping and Efficiency Map," 2023.
[136] E.-D. LUPU, Șt.L. TABACU *Fuel economy and CO_2 emission benefits Of 48 V Mild Hybrid Architectures (P0–P2)* – **a**cceptata spre publicare in revista Ingineria automobilului - ISSN 1842- 4074 – editia septembrie 2026
[137] H. Oh, J. Lee, S. Woo, and H. Park, "Effect of synergistic engine technologies for 48 V mild hybrid electric vehicles," *Energy Conversion and Management,* vol. 244, p. 114515, 2021, doi: 10.1016/j.enconman.2021.114515.
[138] E. P. A. U.S, "Modeling and controls development of 48 V mild hybrid electric vehicles," no. 2018-01-0424, 2018, doi: 10.4271/2018-01-0424.
[139] A. Pundir and A. Saini, "Mild hybrid technology in automotive: A review," *International Journal of Engineering Research \& Technology,* vol. 8, no. 12, 2021, doi: 10.17577/IJERTCONV8IS12011.
[140] B. McKay, "Benefits of a 48 V P2 Mild Hybrid," 2016.
[141] J. J. Eckert, S. F. da Silva, M. A. de Menezes Lourenço, F. C. Corrêa, L. C. A. Silva, and F. G. Dedini, "Energy management and gear shifting control for a hybridized vehicle to minimize gas emissions, energy consumption and battery aging," *Energy Conversion and Management,* vol. 240, p. 114222, 2021, doi: 10.1016/j.enconman.2021.114222.
[142] E.-D. Lupu, Șt.L. Tabacu *System-Level Comparative Assessment of PMSM Rotor Topologies in Battery Electric Vehicles Under the WLTP Driving Cycle*. Vehicles. 2026; 8(3):66. https://doi.org/10.3390/vehicles8030066
[143]. P. B. Tupsaminder, H. S. Mohite, M. G. Jokare, R. M. Shinde, and H. M. Mallad, "Efficiency map model for PMSM to use in EV simulation," *International Journal of Scientific Research in Engineering and Management,* vol. 8, no. 5, 2024, doi: 10.55041/IJSREM34313.
[144] E. D. Lupu, S. L. Tabacu, E. C. Bobric, D. Irimia, V. Vlad "*Impact of thermal management and ambient temperature on aging of LFP, NMC, and NCA batteries for EVs,* " Advanced Power Systems - Smart, Sustainable and Secure Energy Solutions, , March 25-28, 2026, Cluj-Napoca, Romania - ***Conferinta*** published in EPJ Web of Conferences, and indexed in: Web of Science – Conference Proceedings Citation Index (CPCI)/ Scopus
[145] I. Nucă, A. Turcanu, and V. Cazac, "Performance analysis of an urban passenger vehicle powertrain operating in various driving cycle and speed profiles using MATLAB Simscape models," pp. 1—6, 2023, doi: 10.1109/SIELMEN59038.2023.
[146] J. Cen and F. Jiang, "Li-ion power battery temperature control by a battery thermal management and vehicle cabin air conditioning integrated system," *Energy for Sustainable Development,* vol. 57, pp. 141—148, 2020, doi: 10.1016/j.esd.2020.06.004.
[147] H. Dong, H. Qiuhao, D. Li, Z. Li, and Z. Song, "Predictive battery thermal and energy management for connected and automated electric vehicles," *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems,* 2025, doi: 10.1109/TITS.2024.3494734.
[148] S. Goel, S. Chaturvedi, and B. Sharma, "Design and simulation of battery thermal management system for electric vehicles," pp. 1––4, 2025, doi: 10.1109/IATMSI64286.2025.10985437.
[149] K. R. Sree, S. Chowdary Polavarapu, B. Akshitha, S. K. Mahesh, and M. Azmatulla, "Thermal management system for electric vehicle batteries," pp. 1—5, 2025, doi: 10.1109/ICETI4T63625.2025.11132285.
[150] E. D. Lupu, St. L. Tabacu, D. Irimia, E. C. Bobric, *Integrated Thermal Management of Battery Electric Vehicle Propulsion Systems*," Advances in Electrical and Computer Engineering, vol.26, no.1, pp.43-54, 2026, https://doi.org/10.4316/AECE.2026.01005 ***Revista indexată în Scopus***, în domeniile Engineering: Electrical and Electronic Engineering și Computer Science, clasificată Q3 (SJR 2024: 0.238), CiteScore: 2.0 (2024), SNIP: 0.377 (2024), H-index: 30
[151] A. Ranjan, D. V. Bhaskar, P. Kumar, and U. R. Muduli, "Comprehensive analysis of thermal effects on PMSM drive control in small commercial vehicles," pp. 1—6, 2024, doi: 10.1109/PEDES61459.2024.10961171.
[152] "Handbook of Automotive Power Electronics and Motor Drives," 2005, doi: 10.1201/9781420028157.