UNIVERSITATEA NAŢIONALĂ DE ŞTIINŢĂ ŞI TEHNOLOGIE
POLITEHNICA BUCUREŞTI

ŞCOALA DOCTORALĂ DE INGINERIE ELECTRICĂ

REZUMAT
TEZĂ DE DOCTORAT

Contribuţii privind utilizarea teoriei circuitelor electrice în realizarea şi optimizarea unui sistem inteligent de gestionare a bateriilor destinate vehiculelor electrice

Contributions to the application of electric circuit theory in the design and optimization of an intelligent battery management system for electric vehicles

Coordonator ştiinţific:
Prof. dr. ing. Mihai IORDACHE

Doctorand:
Ing. Mihai Rotaru

BUCUREŞTI
2026

Mulţumiri

Elaborarea acestei teze de doctorat a reprezentat o etapă fundamentală în dezvoltarea mea profesională și personală, un parcurs plin de provocări tehnice, dar și de satisfacții pe măsură. Această lucrare nu ar fi fost posibilă fără sprijinul, îndrumarea și încurajările celor care mi-au fost alături.

În primul rând, doresc să îmi exprim profunda recunoștință și cele mai sincere mulțumiri coordonatorului meu științific, Domnul Prof. dr. ing. Mihai IORDACHE. Competența sa științifică remarcabilă, rigoarea academică, răbdarea și sfaturile prețioase mi-au ghidat pașii pe tot parcursul acestui stagiu doctoral. Îi mulțumesc pentru încrederea acordată, pentru timpul dedicat discuțiilor constructive și pentru sprijinul necondiționat în aprofundarea teoriei circuitelor și a analizei sistemelor analogice, elemente care au constituit fundamentul acestei cercetări.

Adresez mulțumiri cadrelor didactice și cercetătorilor din cadrul Departamentului de Electrotehnică și al Școlii Doctorale de Inginerie Electrică din Universitatea Națională de Știință și Tehnologie POLITEHNICA București, pentru mediul academic stimulativ și pentru sprijinul instituțional oferit pe parcursul anilor de studiu.

Un gând deosebit de apreciere se îndreaptă către colegii și coautorii alături de care am colaborat la elaborarea articolelor științifice publicate. Schimburile de idei, munca în echipă în laboratoare, precum și susținerea reciprocă în realizarea și testarea montajelor practice au avut o contribuție esențială la conturarea și validarea rezultatelor prezentate în această lucrare.

Nu în ultimul rând, doresc să le mulțumesc din suflet familiei mele și celor apropiați. Înțelegerea, suportul moral și încurajările lor constante mi-au oferit echilibrul, energia și motivația necesare pentru a depăși momentele dificile și pentru a duce la bun sfârșit acest proiect complex. Le dedic lor această reușită.

CUPRINS

Capitolul 1. Introducere 4
1.1. Prezentarea temei de doctorat 4
1.2. Scopul tezei de doctorat 4
1.3. Conținutul tezei de doctorat 5
Capitolul 2. Analiza motorului asincron în regim dinamic 6
2.1. Introducere: Interacțiunea dintre consumatorul de tracțiune și sistemul de stocare 6
2.2. Analiza ținând seama de caracteristica de magnetizare și de variația rezistenței rotorice cu alunecarea 6
2.3. Analiza motorului cu reluctanță variabilă 8
2.4. Observații și concluzii 9
Capitolul 3. Generarea parametrilor circuitelor biport și a filtrelor analogice 10
3.1. Introducere: Necesitatea modelării etajelor de filtrare 10
3.2. Generarea parametrilor cuadripolilor și filtrelor analogice în regim armonic 10
3.3. Exemple 12
3.4. Generarea funcțiilor de transfer prin metoda ecuațiilor de semi-stare 12
3.5. Observații și concluzii 12
Capitolul 4. Adaptarea impedanței în liniile de transmisie a semnalelor 14
4.1. Introducere: Optimizarea transferului de putere și a comunicației de înaltă frecvență 14
4.2. Proceduri de adaptare a impedanțelor 14
4.3. Adaptarea sarcinilor; diagrama Smith; rețele L, T și Pi 15
4.4. Concluzii 16
Capitolul 5. Sistemul de management al bateriei (BMS) în ecosistemul vehiculelor electrice 17
5.1. Necesitatea, funcțiile vitale și managementul termic 17
5.2. Estimarea SoC și SoH; tehnici de echilibrare a celulelor 18
5.3. Impactul BMS asupra duratei de viață: studiu de caz (Renault Zoe vs. Nissan Leaf) 18
5.4. Concluzii 19
Capitolul 6. Integrarea vehiculelor electrice prin tehnologiile V2X și V2G 23
6.1. Context, conectorul de încărcare și standardele de comunicare bidirecțională 23
6.2. Validări V2G, integrarea cu sisteme fotovoltaice și analiza tehnico-economică 23
6.3. Concluzii 25
Capitolul 7. Proiectarea, realizarea practică și simularea unui sistem BMS cu funcții V2X 26
7.1. Introducere și echipamente utilizate 26
7.2. Arhitectura sistemului și modelarea/simularea V2L în Matlab/Simulink 26
7.3. Rezultate experimentale și analiza performanței 28
7.4. Concluzii 29
Capitolul 8. Concluzii generale, contribuții originale și perspective 33
8.1. Concluzii generale 33
8.2. Contribuții originale 33
8.3. Lista lucrărilor publicate 35
8.4. Perspective de dezvoltare ulterioară 36
Bibliografie selectivă 37

Capitolul 1. Introducere

Transformările accelerate din domeniul mobilității electrice și extinderea utilizării surselor regenerabile schimbă modul în care este produsă, stocată și utilizată energia electrică. În acest context, vehiculul electric nu mai este privit exclusiv ca receptor de energie, ci și ca element activ de stocare, capabil să participe la schimburi bidirecționale de putere. Prin tehnologii de tip Vehicle-to-Grid (V2G), Vehicle-to-Home (V2H) și Vehicle-to-Load (V2L), energia acumulată în baterie poate fi redirecționată către rețea sau către diverși consumatori locali, conferind vehiculului un rol funcțional extins în cadrul sistemelor energetice moderne [1]–[3].

Aplicarea fiabilă a acestor concepte necesită o analiză aprofundată a subsistemelor care alcătuiesc arhitectura energetică a unui vehicul electric. Funcționarea convertoarelor electronice introduce regimuri nesinusoidale ce influențează atât comportarea mașinilor electrice de tracțiune, cât și performanța generală a ansamblului. În paralel, devin necesare proiectarea atentă a filtrelor de interfață, adaptarea corectă a impedanțelor pe liniile de comunicație și implementarea unui sistem performant de management al bateriei, capabil să asigure supravegherea, protecția și exploatarea eficientă a celulelor [4], [5].

Cercetarea propusă urmărește integrarea coerentă a noțiunilor de teoria circuitelor electrice în analiza și dezvoltarea unor soluții aplicabile ecosistemului vehiculelor electrice, cu accent pe optimizarea fluxurilor de energie și pe valorificarea capabilităților bidirecționale ale bateriilor.

1.1. Prezentarea temei de doctorat

Teza are ca obiectiv investigarea, modelarea și optimizarea proceselor energetice specifice vehiculelor electrice, având în centru integrarea funcțiilor V2X și rolul sistemului inteligent de management al bateriei. Demersul pornește de la fundamentele teoriei circuitelor și urmărește transferul acestora către aplicații actuale, relevante pentru infrastructura de încărcare, conversia de putere și exploatarea flexibilă a energiei stocate.

Abordarea include modelarea elementelor de tracțiune și a circuitelor de interfațare, precum și analiza structurilor utilizate pentru filtrare, adaptare de impedanță și control energetic. Această bază teoretică este extinsă apoi către studiul sistemelor BMS, esențiale pentru funcționarea sigură și eficientă a bateriilor Li-Ion. Un punct central îl constituie demonstrarea posibilității de utilizare a bateriilor din vehicule electrice nu doar pentru propulsie, ci și ca resurse energetice bidirecționale, compatibile inclusiv cu sisteme hibride rezidențiale care includ generare fotovoltaică.

1.2. Scopul tezei de doctorat

Evoluția recentă a sistemelor de management al bateriilor a fost determinată de necesitatea limitării degradării electrochimice și a creșterii duratei de viață a celulelor Li-Ion [6]–[8]. Dacă primele generații de vehicule electrice erau afectate de diminuări accentuate ale autonomiei, soluțiile actuale se bazează pe algoritmi avansați de monitorizare și estimare, capabili să urmărească starea individuală a celulelor și să aplice strategii eficiente de echilibrare. Astfel,

BMS-ul a devenit un subsistem critic pentru menținerea siguranței, performanței și fiabilității întregului pachet de baterii [9], [10].

Implementarea tehnologiilor V2X presupune depășirea unor dificultăți tehnice care depășesc simpla existență a unui standard de comunicare. Deși cadre precum ISO 15118 oferă suport pentru schimbul de informații, realizarea practică a interfeței fizice implică soluții robuste de adaptare a impedanței, compatibilitate electromagnetică și proiectarea unor convertoare capabile să funcționeze în condiții deformante, fără a afecta stabilitatea rețelei sau funcționarea sistemului de tracțiune. Scopul tezei este dezvoltarea unei perspective integrate asupra acestor probleme, din punctul de vedere al teoriei circuitelor și al aplicabilității inginerești [11], [12].

1.3. Conținutul tezei de doctorat

Lucrarea este organizată în opt capitole, concepute astfel încât să urmărească un traseu logic, de la bazele teoretice ale modelării circuitelor și sistemelor electrice până la validarea experimentală a unei soluții BMS cu funcții V2X.

Primul capitol introduce contextul general al cercetării, prezintă relevanța temei și formulează obiectivele principale. Capitolul al doilea este dedicat analizei motorului asincron în regim dinamic și evidențiază influența neliniarităților și a armonicilor asupra performanțelor sistemului de tracțiune, prin instrumente de simulare și metode de analiză a comportării mașinii electrice în condiții complexe de funcționare [13]–[16].

În capitolul al treilea sunt dezvoltate metode pentru generarea parametrilor caracteristici ai circuitelor biport și ai filtrelor analogice, cu accent pe obținerea unor expresii simbolice și numeric-simbolice utile pentru modelarea exactă a rețelelor de interfațare. Capitolul al patrulea tratează adaptarea impedanței în liniile de transmisie, cu accent pe utilizarea diagramei Smith în proiectarea structurilor de adaptare specifice circuitelor de înaltă frecvență [17]–[20].

Capitolul al cincilea analizează arhitectura și funcțiile sistemului de management al bateriei, insistând asupra estimării parametrilor interni și asupra tehnicilor de echilibrare a celulelor, incluzând un studiu comparativ privind degradarea bateriilor utilizate în vehicule electrice comerciale. Capitolul al șaselea extinde analiza către integrarea vehiculelor electrice în aplicații V2X și discută atât aspectele de comunicare bidirecțională, cât și implicațiile tehnico-economice ale utilizării bateriei vehiculului ca resursă energetică flexibilă [21], [22].

Capitolul al șaptelea reunește contribuțiile aplicative, prin prezentarea unui montaj experimental BMS cu funcție V2L și prin modelarea acestuia într-un mediu de simulare, urmărind validarea transferului de putere și corelarea rezultatelor experimentale cu cele teoretice. În ultimul capitol sunt sintetizate concluziile generale, contribuțiile originale și direcțiile de continuare a cercetării.

Capitolul 2. Analiza motorului asincron în regim dinamic

2.1. Introducere: Interacțiunea dintre consumatorul de tracțiune și sistemul de stocare

Performanța unui vehicul electric și capacitatea sa de integrare în aplicații de tip V2X sau V2G depind direct de corelarea dintre subsistemul de tracțiune și cel de stocare a energiei. Proiectarea unui BMS eficient nu poate fi separată de analiza regimului de funcționare al mașinii electrice, iar elaborarea soluțiilor de filtrare și a structurilor de adaptare pentru comunicația bidirecțională presupune cunoașterea exactă a surselor de perturbații generate în ansamblul de putere.

Motorul asincron, utilizat frecvent în sistemele moderne de propulsie electrică, are un comportament dinamic complex și pronunțat neliniar. Saturația magnetică a circuitului feromagnetic, împreună cu variația parametrilor rotorici (efectele asociate alunecării și distribuției curentului în conductoare), influențează forma curenților și tensiunilor. Atunci când aceste neliniarități se suprapun peste procesele de comutație ale convertoarelor statice, rezultatul este un regim deformant accentuat în rețeaua internă a vehiculului [17], [23].

Armonicile generate nu afectează doar motorul, ci se propagă și către sursa de curent continuu, crescând solicitarea energetică și termică a bateriei. Apar pierderi suplimentare, se reduce eficiența conversiei, iar exploatarea sistemului devine mai dificil de controlat. De aceea, înaintea dezvoltării unei arhitecturi BMS destinate transferului bidirecțional, este necesară evaluarea riguroasă a surselor primare de deformare armonică, prin analiza motorului asincron în regim dinamic și prin fundamentarea matematică a comportării sale cu ajutorul programelor specializate de simulare [14]–[16], [24], [25].

2.2. Analiza ținând seama de caracteristica de magnetizare și de variația rezistenței rotorice cu alunecarea

Analiza sistemelor electromagnetice excitate periodic prin semnale complexe prezintă interes atât teoretic, cât și aplicativ. În rețelele electroenergetice, abaterea de la regimul sinusoidal ideal este asociată unui regim deformant produs de elemente neliniare sau de imperfecțiuni constructive ale surselor și consumatorilor. Printre cauzele importante se numără repartiția nesinusoidală a inducției în întrefier, saturația miezurilor feromagnetice, prezența electronicii de putere și funcționarea unor sarcini puternic neliniare [23].

Pentru investigarea regimurilor periodice nesinusoidale s-au dezvoltat numeroase metode, împărțite în două categorii: metode formulate în domeniul timp (variante ale metodei împușcării – SH) și metode dezvoltate în domeniul frecvență (forme ale metodei balanței armonice – HBM). Alegerea metodei depinde de structura circuitului, de gradul de neliniaritate și de precizia urmărită în evidențierea armonicilor [24], [26]–[27].

Modelul utilizat pornește de la schema echivalentă în Π a motorului de inducție, în care inductanța de magnetizare este introdusă sub forma unei bobine neliniare comandate în curent, iar rezistența rotorică este considerată variabilă în timp, depinzând de alunecare. Această

alegere permite reprezentarea realistă a influenței saturației magnetice și a modificării parametrilor rotorici asupra răspunsului sistemului [14], [15], [24].

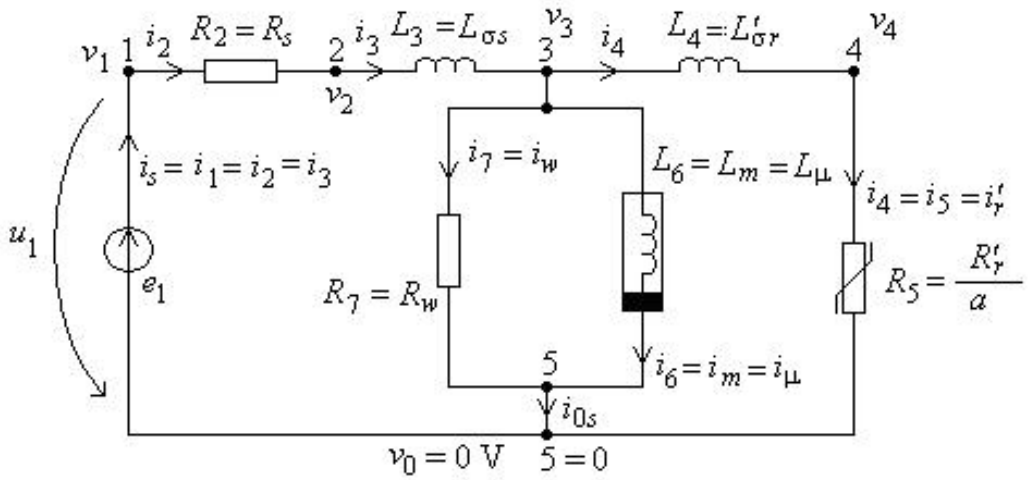


Figura 2.1. Schema echivalentă în Π a motorului de inducție.

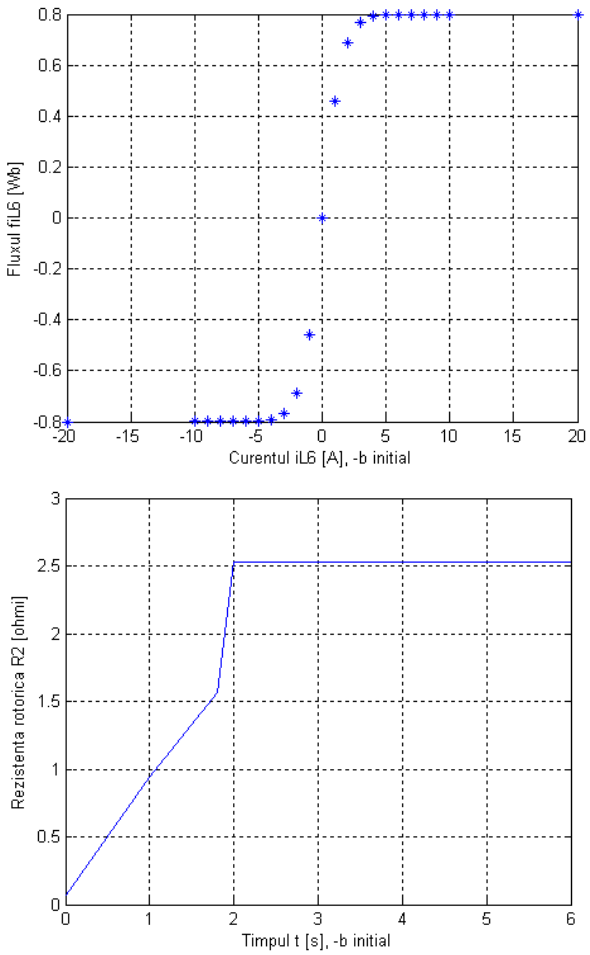


Figura 2.2. a) Caracteristica Lm(iLm) = L6(iL6); b) Caracteristica R2(t).

Ecuațiile de stare în formă simbolică-normală pentru motorul de inducție sunt integrate cu rutinele de integrare din mediul MATLAB [19]. Ecuațiile nodale modificate, obținute prin algoritmul Euler de integrare implicită, sunt rezolvate la fiecare pas de timp, caracteristica de magnetizare fiind aproximată prin segmente de dreaptă. Fișierul de intrare de tip netlist, cerut

de programul ACAP, descrie topologia circuitului și caracteristicile neliniare date prin puncte [18].

Pentru simularea în SPICE a bobinei neliniare controlate în curent se utilizează o schemă echivalentă bazată pe surse comandate, în care rezistorul neliniar controlat în tensiune are caracteristica identică cu cea a fluxului în funcție de curent. Rezultatele obținute cu programele ACAP și SPICE au fost comparate prin analiză în domeniul timp și prin analiză Fourier a formelor de undă de curent și tensiune.

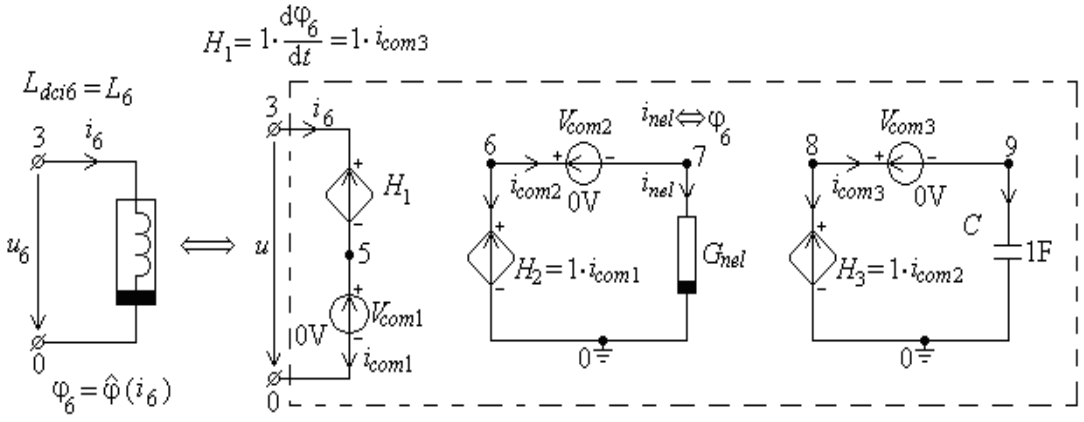


Figura 2.3. Simularea în Spice a bobinelor neliniare controlate în curent.

2.3. Analiza motorului cu reluctanță variabilă

Motorul cu reluctanță variabilă este un motor monofazat de curent alternativ, a cărui funcționare se bazează pe modificarea inductivității. Din perspectiva proiectării și exploatării este importantă cunoașterea variației curenților în regim tranzitoriu. Pe baza valorilor numerice ale parametrilor circuitului echivalent au fost determinate variațiile în timp ale curenților în regimul tranzitoriu apărut la conectarea motorului la rețeaua de alimentare, cu condiții inițiale nule.

Rulând programul ACAP via MATLAB, cu fișierul de intrare corespunzător, s-au obținut variațiile în timp și analiza Fourier ale tensiunilor și curenților din circuit. Rezultatele au fost validate prin simulare în SPICE, constatându-se o concordanță foarte bună între cele două programe [28], [19].

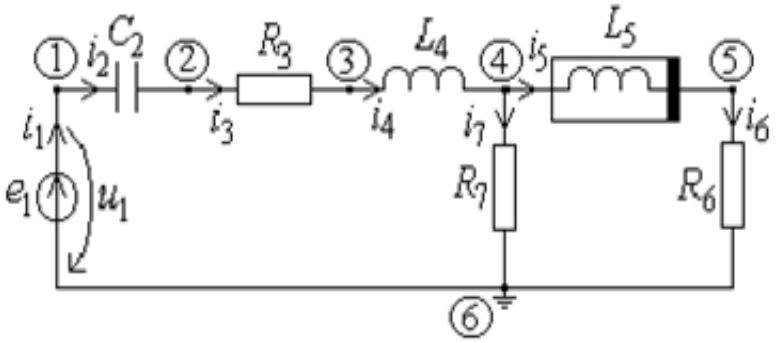


Figura 2.4. Circuitul echivalent al motorului cu reluctanță variabilă.

2.4. Observații și concluzii

În acest capitol a fost investigată influența saturației magnetice asupra performanțelor motorului de inducție, pornind de la schema echivalentă în Π, în care inductanța de magnetizare a fost modelată ca bobină neliniară comandată în curent, iar rezistența rotorică a fost considerată variabilă în timp. Simulările au fost realizate cu programele ACAP, CSAP și SPICE, toate bazate pe formularea ecuațiilor nodale modificate și capabile să furnizeze analiza Fourier a formelor de undă.

Rezultatele evidențiază faptul că prezența armonicilor de ordin superior conduce la creșterea pierderilor în cupru și în miez și la diminuarea randamentului și a factorului de putere, în timp ce cuplul electromagnetic dezvoltat crește semnificativ. Originalitatea constă în faptul că programele ACAP, SYSEG și CSAP pot analiza circuite analogice în mod complet simbolic, numeric-simbolic sau numeric, permițând considerarea unor parametri ai circuitului echivalent ca simboluri și analiza performanțelor motorului în diferite regimuri de lucru. Pentru integrarea ecuațiilor diferențiale liniare și neliniare au fost utilizate rutine MATLAB, foarte eficiente pentru acest tip de ecuații.

Capitolul 3. Generarea parametrilor circuitelor biport și a filtrelor analogice

3.1. Introducere: Necesitatea modelării etajelor de filtrare

Analiza regimurilor deformate asociate conversiei statice de putere evidențiază necesitatea unor etaje de filtrare proiectate riguros. Comutația invertoarelor, împreună cu neliniaritățile mașinilor electrice, degradează calitatea energiei și poate afecta compatibilitatea electromagnetică a ansamblului. În lipsa unor structuri de filtrare adecvate, energia transferată bidirecțional între vehicul și rețea poate depăși limitele admise pentru distorsiunea armonică totală și pentru nivelul perturbațiilor conduse.

Dimensionarea filtrelor și a rețelelor de interfațare presupune o modelare fidelă a circuitelor biport. Parametrii clasici de descriere (Z, Y, T, H) rămân utili în analiza teoretică, însă aplicarea lor directă la frecvențe ridicate este dificilă experimental. De aceea, în proiectarea circuitelor de înaltă frecvență devine esențială utilizarea parametrilor de împrăștiere (S) și a procedurilor de conversie între diferitele reprezentări. Capitolul dezvoltă cadrul teoretic și numeric necesar generării automate a funcțiilor de transfer și a matricelor de parametri pentru rețele cuadripolare liniare pasive.

3.2. Generarea parametrilor cuadripolilor și filtrelor analogice în regim armonic

3.2.1. Chestiuni teoretice

Comportamentul rețelelor liniare cu două porți în regim armonic poate fi descris prin mai multe familii de parametri. La frecvențe joase și medii se utilizează matricele Z, Y, H, T sau F, care permit formularea compactă a relațiilor dintre tensiunile și curenții porturilor [31], [26], [32]–[34]. Pe măsură ce frecvența crește, condițiile experimentale pentru determinarea acestor parametri devin mai greu de realizat.

În domeniul microundelor și al comunicațiilor de înaltă frecvență, caracterizarea rețelelor se bazează pe parametrii de împrăștiere, deoarece la astfel de frecvențe mărimile măsurabile sunt undele incidente, reflectate și transmise. Parametrii S oferă o descriere directă a fenomenelor de reflexie și transmisie, fără a impune regimuri de testare dificile (mers în gol sau scurtcircuit ideal), fiind indispensabili în analiza circuitelor RF, a componentelor integrate de înaltă frecvență și a structurilor de transfer de energie fără contact galvanic [34]–[38].

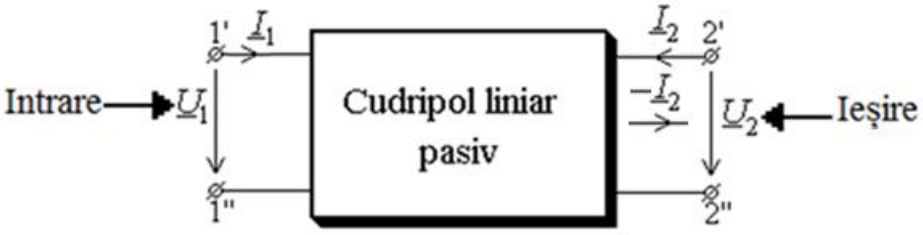


Figura 3.1. Schema circuitului biport liniar pasiv.

Pentru un biport liniar pasiv, ecuațiile exprimate prin parametrii fundamentali (de transfer) în regim armonic leagă mărimile de la o poartă de cele de la cealaltă: U1 = A·U2 + B·I2 și I1

= C·U2 + D·I2. Pornind de la aceste relații se obțin ecuațiile în impedanțe de transfer (Z), în admitanțe de transfer (Y), în parametri hibrizi (H) și în parametri F (inverșii hibrizilor), fiecare set fiind adecvat descrierii anumitor dispozitive [16], [33], [17].

Un cuadripol liniar pasiv este reciproc dacă determinantul matricei fundamentale satisface AD − BC = 1, condiție echivalentă cu relații specifice între parametrii Z și Y. Cuadripolul reciproc este simetric dacă A = D, adică dacă cele două porți se pot interschimba fără modificarea ecuațiilor. Pentru un cuadripol liniar pasiv se definesc, de asemenea, impedanțele caracteristice și impedanțele imagine, exprimate în funcție de parametrii fundamentali [31], [26], [29], [30].

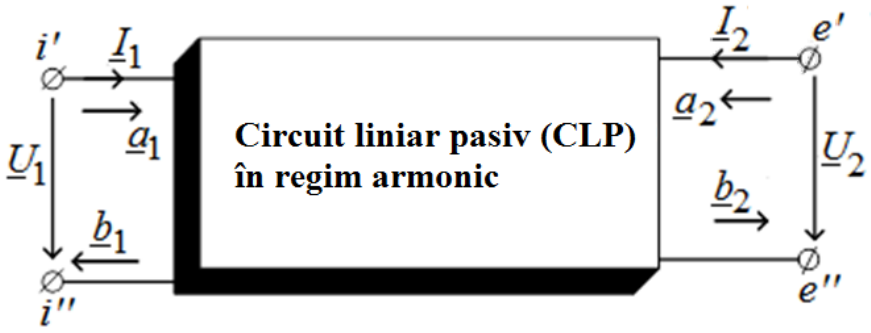


Figura 3.2. Circuit utilizat pentru definirea parametrilor S.

3.2.2. Generarea automată a funcțiilor de transfer și conversia între parametri

Conversia dintre parametrii S și reprezentările clasice ale cuadripolilor are o importanță practică majoră, deoarece permite trecerea de la măsurători realizabile experimental (cu analizorul de rețea) la mărimi utile în proiectare. Un set de date măsurat poate fi transformat în parametri Z, Y sau T, facilitând dimensionarea filtrelor, evaluarea adaptării și estimarea performanțelor energetice ale structurii [34]–[39], [16].

Procedurile de calcul pornesc de la relațiile definitorii ale parametrilor Z, Y, T, H și F și conduc la generarea funcțiilor de transfer asociate. Implementarea este realizată atât prin ecuații nodale modificate, cât și prin ecuații de stare, astfel încât metodologia să poată fi aplicată flexibil unor configurații circuitale diferite. Pentru generarea parametrilor S în funcție de elementele matricei parametrilor fundamentali T se procedează, în mediul MAPLE, prin exprimarea variabilelor U1, U2, I1, I2 în funcție de undele a1, a2, b1, b2 și de impedanța de referință Z0, rezolvarea sistemului și identificarea coeficienților S11, S12, S21, S22.

Implementările dezvoltate în MAPLE și MATLAB automatizează etape de calcul tradițional laborioase și predispuse la erori. Prin această automatizare devine posibilă compararea rapidă a rezultatelor teoretice cu cele numerice și experimentale, precum și explorarea influenței parametrilor asupra comportării globale a circuitului. Metoda este utilizată pentru circuite cuadripolare, filtre analogice și structuri cu bobine cuplate magnetic, de interes în transferul wireless de putere și în etajele de interfațare ale vehiculelor electrice.

3.3. Exemple

Procedurile propuse au fost validate prin exemple reprezentative. Pentru un cuadripol dat se generează mai întâi parametrii fundamentali (de transfer), care implică cele mai simple funcții de transfer, iar pe baza acestora se calculează ceilalți parametri (Z, Y, H, F, S) utilizând relațiile teoretice. Funcțiile de transfer necesare sunt obținute prin ecuații nodale modificate, generate cu programele ACAP, CSAP și TFSYG, sau prin ecuații de stare furnizate de programul SYSEG [35], [29], [30], [14], [15].

Exemplele includ și structuri cu rezonatoare cuplate magnetic, relevante pentru transferul wireless de putere. Pe baza matricelor caracteristice Z, Y, T, H și S devine posibilă delimitarea precisă a benzilor de trecere și de atenuare, facilitând identificarea tipului de filtru și a proprietăților sale funcționale.

3.4. Generarea funcțiilor de transfer prin metoda ecuațiilor de semi-stare

Pentru circuite cu elemente în exces (de exemplu rezonatoare cuplate magnetic în conexiune serie-serie), funcțiile de transfer se generează folosind ecuațiile de semi-stare. Programul SSEMG (Semi-State Equation Matrix Generation), apelat via MATLAB, permite obținerea matricei funcțiilor de transfer H(s) pentru sisteme cu o singură intrare și o singură ieșire (SISO) sau cu intrări și ieșiri multiple (MIMO).

Considerând ca mărimi de ieșire curenții prin bobine și tensiunile pe condensatoare, iar ca mărimi de intrare sursele independente de tensiune și de curent, se generează matricea H(s) cu polii și zerourile sale, după care, prin transformata Laplace inversă, se obțin variațiile în timp ale variabilelor de semi-stare și ale puterii instantanee furnizate sarcinii.

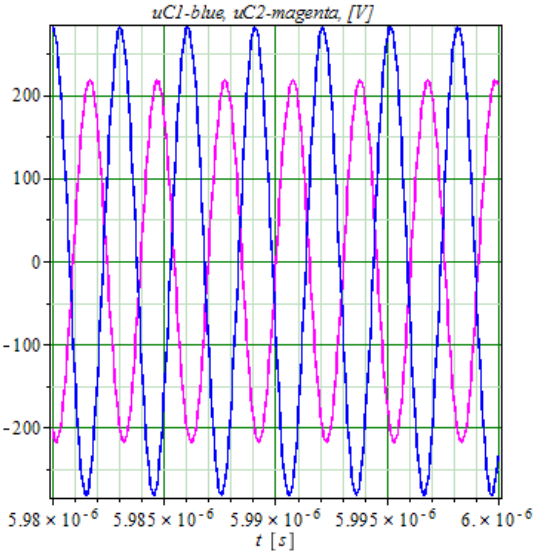


Figura 3.3. Variațiile în timp ale tensiunilor uC1 și uC2 (rezultate obținute prin metoda ecuațiilor de semi-stare).

3.5. Observații și concluzii

Capitolul prezintă metode avansate pentru generarea parametrilor caracteristici ai circuitelor cuadripolare liniare și ai circuitelor neliniare aproximabile prin liniarizare pe porțiuni, precum și ai filtrelor analogice. Metodologia este aplicabilă circuitelor care includ

elemente în exces și oricărui multipol sau multiport descriptibil printr-o schemă echivalentă alcătuită din elemente dipolare și surse comandate.

Programele CSAP și TFSYG integrează tehnici de calcul simbolic și numeric: formularea automată a ecuațiilor nodale modificate în formă simbolică, parțial simbolică sau numerică, generarea funcțiilor de circuit, analiza în c.c., c.a. și în domeniul operațional, determinarea polilor și zerourilor și construirea matricelor metodei nodale modificate. Un avantaj important îl reprezintă analiza de senzitivitate, prin care pot fi identificate elementele critice și intervalele admisibile de variație ale parametrilor în raport cu performanțele impuse.

Pornind de la relațiile de definiție ale parametrilor fundamentali A, B, C, D, lucrarea propune proceduri eficiente pentru generarea funcțiilor de transfer în formă complet simbolică, parțial simbolică sau complet numerică, urmate de generarea automată a parametrilor Z, Y, T, H, F și S. În completarea programelor ACAP, CSAP, TFSYG și SYSEG, mediile MAPLE, ANSYS și MATLAB contribuie la automatizarea procesului de calcul și la prelucrarea rezultatelor [35], [29], [30], [24], [36]–[37]. Rutinele dedicate permit o validare încrucișată riguroasă, prin compararea rezultatelor numerice cu datele din literatură și cu măsurătorile efectuate pe standul experimental.

Capitolul 4. Adaptarea impedanței în liniile de transmisie a semnalelor

4.1. Introducere: Optimizarea transferului de putere și a comunicației de înaltă frecvență

Filtrarea distorsiunilor armonice asigură calitatea undei de tensiune și curent, însă transferul eficient al energiei și al pachetelor de date în sistemele V2X depinde de o condiție fizică suplimentară: adaptarea impedanțelor. La frecvențe înalte, diferența de impedanță dintre sursă și sarcină generează unde reflectate, care reduc drastic eficiența transferului energetic și pot deteriora componentele electronice de putere.

Sistemele de încărcare bidirecțională utilizează standarde complexe de comunicare (precum ISO 15118), care adesea folosesc tehnologia Power Line Communication (PLC) suprapusă peste liniile de forță. Orice dezadaptare a impedanței cauzează atenuarea semnalului, erori de protocol și pierderi de putere activă. Pentru a anula reactanțele parazite și a maximiza puterea livrată se impune implementarea unor rețele de adaptare, realizate fie cu componente cu parametri concentrați (inductanțe și capacități), fie cu tronsoane de linii de transmisie. Un instrument analitic și grafic central în această etapă de proiectare este diagrama Smith.

4.2. Proceduri de adaptare a impedanțelor

Adaptarea impedanței se referă la ajustarea impedanței unei surse sau sarcini pentru a maximiza transferul de putere sau pentru a minimiza reflexiile. Conform teoremei transferului de putere maximă, puterea activă transferată este maximă atunci când impedanța de sarcină este conjugata complexă a impedanței sursei, $ZL = ZS^*$, astfel încât componentele reactive se anulează reciproc [43]–[44].

Acolo unde ZS reprezintă impedanța caracteristică a unei linii de transmisie, reflexia minimă se obține atunci când ZL = ZS. Într-un circuit de curent continuu condiția se reduce la egalitatea rezistențelor; în curent alternativ, reactanța depinde de frecvență, astfel încât adaptarea realizată la o anumită frecvență nu mai este, în general, valabilă în afara acesteia. Adaptarea pe bandă largă necesită de regulă rețele complexe, asemănătoare filtrelor, cu excepția cazului în care impedanțele sunt pur rezistive, când poate fi utilizat un transformator.

Transfer maxim de putere: $ZL = ZS^*$ Reflexie minimă pe linie: $ZL = ZS$

Pentru evaluarea gradului de adaptare se utilizează pierderea de returnare (Return Loss, PR/RL), care exprimă atenuarea semnalului reflectat către sursă, și pierderea de inserție (Insertion Loss, IL), care caracterizează diminuarea semnalului util introdus de rețea. În cazul ideal al unei sarcini perfect adaptate, PR tinde către $-\infty$; în practică, valorile cuprinse aproximativ între 35 și 45 dB corespund unui regim de adaptare foarte bun, iar scurtcircuitul sau funcționarea în gol corespund unei pierderi de retur de 0 dB [40], [45]–[47].

$$RL = 10\cdot\log10(Pi/Pr) = -20\cdot\log10|\Gamma| \qquad IL = 10\cdot\log10(P_{ieșire}/P_{intrare})$$

Prin utilizarea parametrilor de împrăștiere, performanța unui circuit RF poate fi caracterizată complet fără a cunoaște structura sa internă, circuitul fiind tratat ca o „cutie

neagră" descrisă exclusiv prin relațiile dintre undele incidente și cele reflectate la porțile sale. Achiziția experimentală a coeficienților S se realizează cu analizorul vectorial de rețea (VNA), prin terminarea adaptată succesivă a porților la impedanța de referință (de regulă 50 Ω) [46]–[47].



Figura 4.1. Reprezentarea pierderii de retur și a pierderii de inserție într-o linie de transmisie ideală.

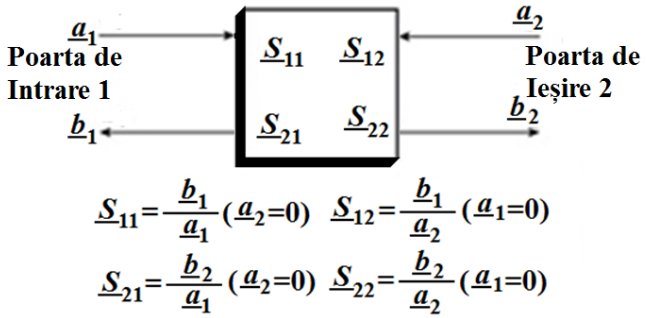


Figura 4.2. Reprezentarea parametrilor S pentru un circuit de microunde cu două porți.

4.3. Adaptarea sarcinilor; diagrama Smith; rețele L, T și Pi

Adaptarea unei sarcini pur rezistive se poate realiza utilizând o linie de transmisie cu impedanță caracteristică aleasă convenabil, în timp ce adaptarea unei sarcini complexe se obține cu elemente pasive concentrate dispuse complementar (unul în serie, celălalt în derivație). Rezultă două topologii clasice: configurația derivație–serie și configurația serie–derivație.

Diagrama Smith permite determinarea intuitivă și eficientă a elementelor de circuit necesare adaptării, atât pentru configurații serie, cât și pentru configurații paralel, precum și pentru combinații ale acestora. Studiul combinat al diagramei Smith în reprezentare de impedanță și de admitanță (diagrama de imitanțe) facilitează urmărirea deplasării punctului de lucru și alegerea configurației optime, inclusiv în cazul adaptării fără linii de transmisie.

Pentru rețelele de adaptare în secțiune L, T și Pi se determină analitic valorile elementelor reactive. În cazul rețelei Pi, deoarece există trei elemente de determinat și doar două ecuații (egalarea părților reală și imaginară a impedanței echivalente cu cele ale impedanței sursă), valoarea unuia dintre elemente se alege arbitrar, ținând seama de frecvența de funcționare, astfel încât frecvențele de rezonanță să fie apropiate de aceasta. [40], [41]–[42].

Procedurile de adaptare, inclusiv cele bazate pe linii de transmisie, pot fi implementate cu ușurință în medii de calcul precum MAPLE sau MATLAB. În literatura indicată sunt prezentate și rutine de calcul automat ale parametrilor RUST/VSWR, ale coeficientului de reflexie, ale puterii pe sarcină și ale parametrilor S [42], [45]–[47].

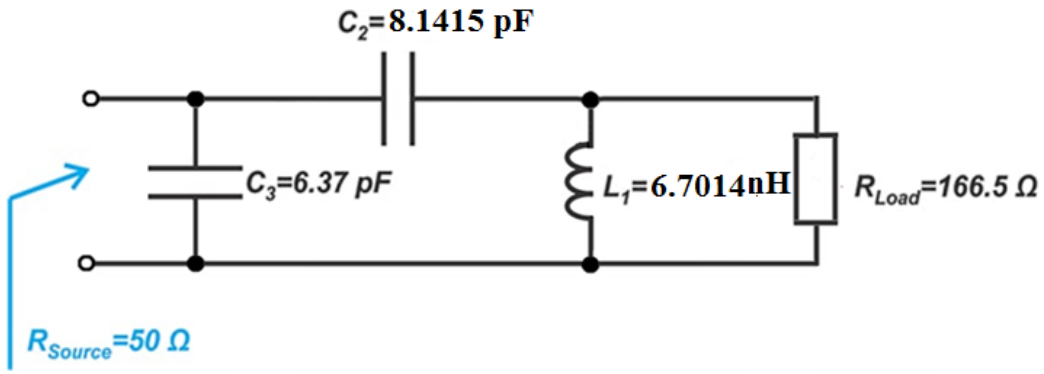


Figura 4.3. Exemplu de rețea de adaptare de tip Pi.

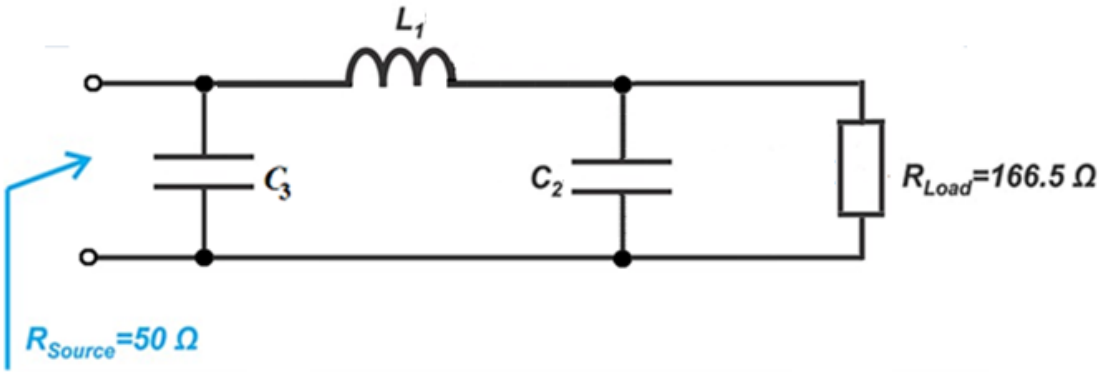


Figura 4.4. Rețea Pi cu rezistența de sarcină conectată în paralel cu capacitatea C2.

4.4. Concluzii

Adaptarea impedanței reprezintă o operație fundamentală de proiectare, având ca obiectiv fie maximizarea transferului de putere, fie minimizarea reflexiilor de semnal. Importanța sa este deosebită în circuitele analogice, sistemele de transfer wireless al energiei, liniile de transmisie, interfețele de radiofrecvență și structurile de conversie energetică operate la frecvențe înalte.

Majoritatea procedeelor de adaptare se bazează pe teorema transferului maxim de putere. Capitolul include și prezentarea unui dispozitiv de urmărire a punctului de putere maximă, utilizat pentru extragerea eficientă a energiei dintr-un panou fotovoltaic: în raport cu panoul, dispozitivul respectă principiul transferului maxim de putere, în timp ce la ieșire conexiunea este de tip punte de impedanță, proiectată pentru a maximiza randamentul prin realizarea unei interfețe de tip sursă de tensiune ridicată cu impedanță internă scăzută.

Un rol esențial îl are diagrama Smith, utilizată pe scară largă pentru determinarea elementelor de circuit. În practică, valorile exacte ale bobinelor și condensatoarelor nu pot fi întotdeauna implementate identic cu cele teoretice, componentele reale fiind disponibile doar în serii standardizate și prezentând neidealități (rezistențe parazite, toleranțe, dependențe de frecvență). De aceea, proiectarea urmărește mai ales înțelegerea modului în care fiecare element reactiv deplasează impedanța pe diagrama Smith, ceea ce face procesul considerabil mai accesibil și mai eficient.

Capitolul 5. Sistemul de management al bateriei (BMS) în ecosistemul vehiculelor electrice

5.1. Necesitatea, funcțiile vitale și managementul termic

Un pachet de baterii pentru vehicule electrice este constituit dintr-un număr ridicat de celule individuale, conectate în topologii serie-paralel pentru a asigura tensiunile și curenții ceruți de tracțiune. Celulele litiu-ion nu au caracteristici perfect identice, apărând variații de capacitate, rezistență internă și rate de auto-descărcare. Fără un control strict, aceste abateri conduc la supraîncărcarea celulelor slabe și la subîncărcarea celor cu capacitate superioară.

Sistemul de Management al Bateriei (BMS) acționează ca unitate centrală de decizie: monitorizează parametrii de operare, coordonează schimbul de energie cu infrastructura externă și protejează acumulatorul împotriva regimurilor distructive [4], [5], [7]. Rezerva de siguranță a producătorului limitează starea de încărcare, bateria nefiind niciodată încărcată sau descărcată complet fizic; diferența dintre SoC-ul tehnic și cel operațional este o măsură esențială de protecție. Arhitectura BMS integrează circuite de eșantionare, microcontrolere pentru estimarea stărilor interne și module de comunicație (magistrala CAN).

Generarea de căldură este inerentă proceselor de încărcare și descărcare. Temperatura optimă de funcționare a celulelor Li-Ion se situează în intervalul 15–35 °C [8]; depășirea acestor limite accelerează degradarea sau reduce capacitatea disponibilă. Managementul termic (BTMS) previne ambalarea termică, monitorizând temperatura lichidului de răcire și a modulelor și limitând automat puterea la detecția unei supraîncălziri. Soluțiile de răcire variază de la aer (forțat sau pasiv, sub 1 kW) la lichid (contact direct cu lichide dielectrice sau indirect, prin plăci de răcire cu amestec apă-glicol), la care se adaugă soluții emergente precum materialele cu schimbare de fază (PCM), conductele de căldură și răcirea termoelectrică [4], [48].

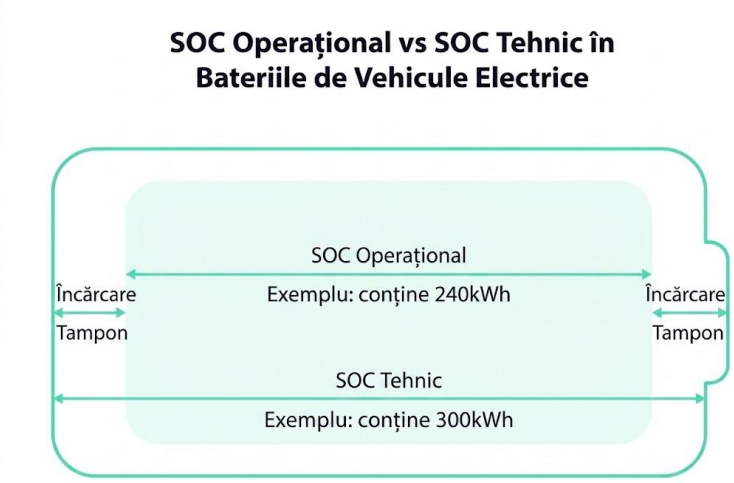


Figura 5.1. Diferența între SoC operațional și SoC tehnic.

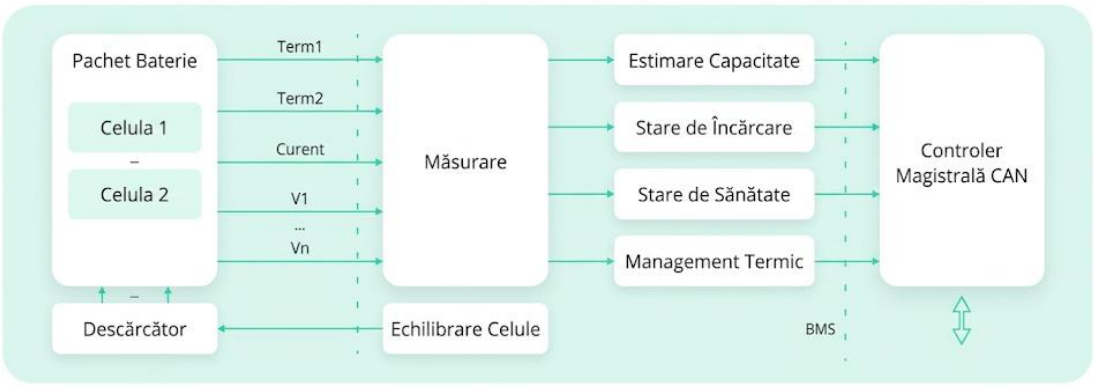


Figura 5.2. Schema bloc cu funcționarea sistemului BMS.

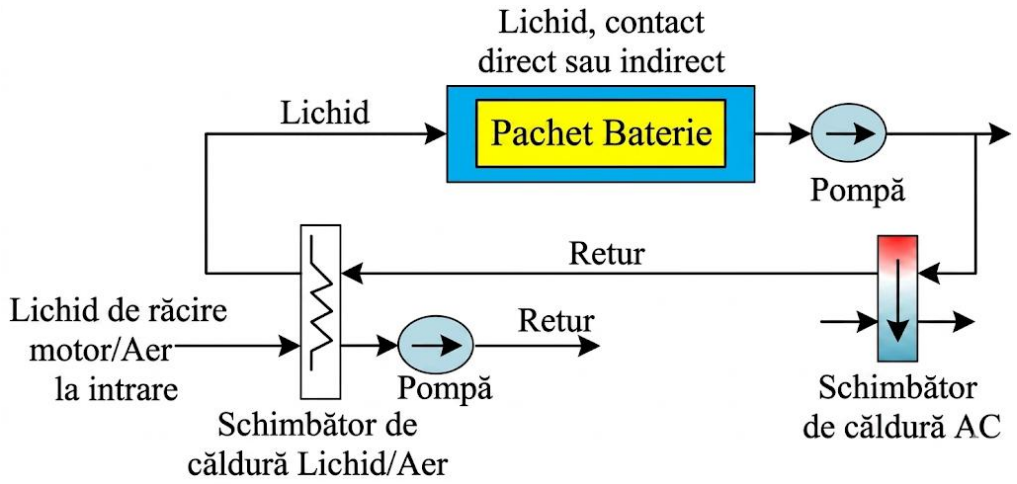


Figura 5.3. Schema bloc a managementului termic (răcire cu lichid).

5.2. Estimarea SoC și SoH; tehnici de echilibrare a celulelor

Starea de încărcare (SoC) exprimă raportul dintre energia disponibilă și capacitatea maximă utilizabilă. Determinarea sa este dificilă din cauza caracterului neliniar al proceselor electrochimice. Metoda clasică de integrare a curentului (Coulomb counting) acumulează progresiv erori; pentru limitarea derivei, sistemele BMS moderne utilizează modele de circuit echivalent (ECM) corelate cu algoritmi recursivi precum filtrul Kalman extins, care corectează continuu estimarea prin raportare la tensiunea în circuit deschis (OCV) [6], [10], [49], [50].

Starea de sănătate (SoH) este o metrică a degradării, definită ca raportul dintre capacitatea maximă actuală și capacitatea nominală. Pierderea de capacitate apare din reacțiile parazite de la interfața electrolit-electrod (SEI) [8]; scăderea SoH sub 70–80 % indică sfârșitul duratei de viață utile în regim de tracțiune (EOL), bateria putând fi relocată în aplicații staționare.

Echilibrarea menține o distribuție uniformă a nivelurilor de încărcare, întrucât o singură celulă descărcată oprește funcționarea întregului pachet. Echilibrarea pasivă disipă excesul de energie pe rezistoare de șuntare, fiind simplă și ieftină, dar ineficientă energetic și generatoare de căldură. Echilibrarea activă utilizează convertoare DC-DC pentru a transfera sarcina de la celulele puternic încărcate către cele deficitare (arhitecturi bypass celular, celulă-la-celulă sau

celulă-la-pachet), recuperând energia și maximizând capacitatea utilizabilă, cu prețul unei complexități hardware mai mari [9].

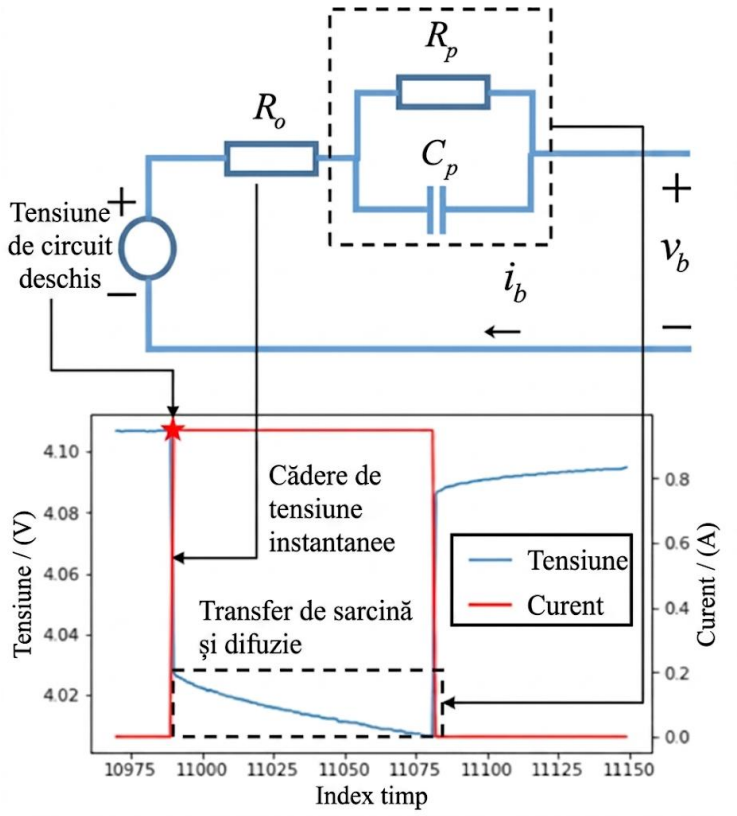


Figura 5.4. Model de circuit echivalent RC al bateriei.

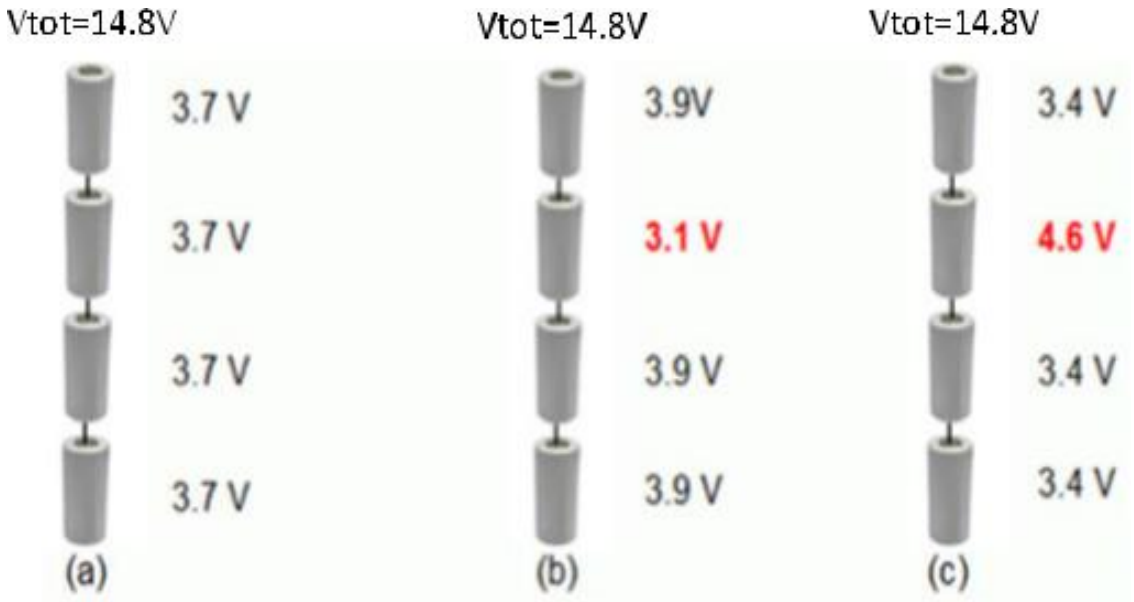


Figura 5.5. Exemplu de variații ale încărcării celulelor.

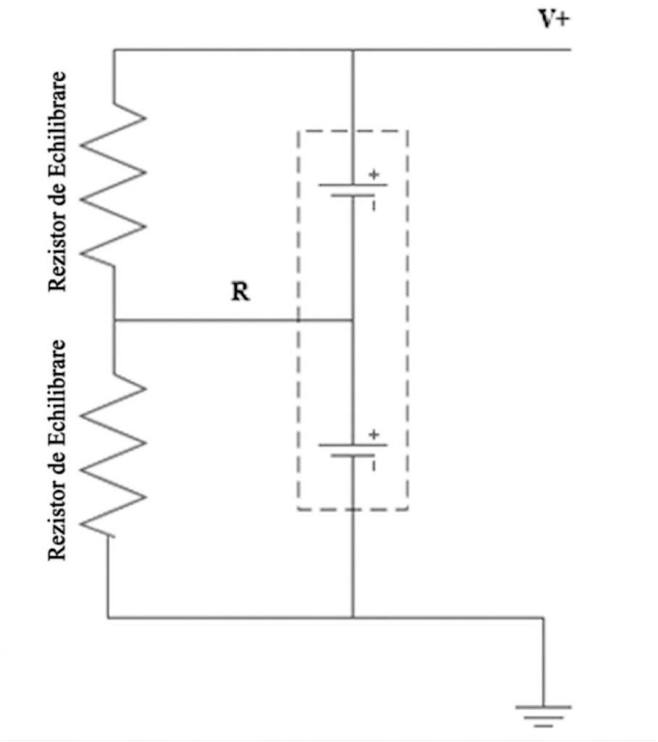


Figura 5.6. Circuit de echilibrare pasivă.

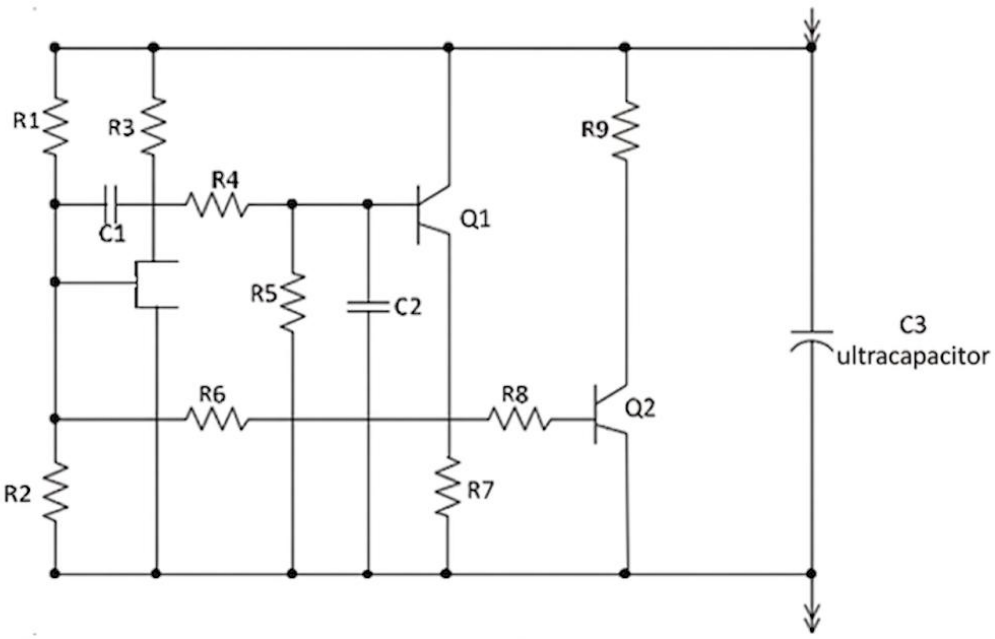


Figura 5.7. Circuitul modelului de echilibrare a celulelor active.

5.3. Impactul BMS asupra duratei de viață: studiu de caz (Renault Zoe vs. Nissan Leaf)

Evoluția strategiilor de control din cadrul BMS a modificat radical fiabilitatea acumulatorilor pe piața vehiculelor second-hand. Adoptarea chimiei NMC în defavoarea LMO a permis creșterea densității energetice, însă calitatea algoritmilor BMS a făcut diferența în exploatare. Tabelul 5.1 sintetizează parametrii câtorva generații Renault Zoe și Nissan Leaf.

Tabelul 5.1. Comparație parametri Renault Zoe și Nissan Leaf

Model / an	Cap. utiliz. [kWh]	Cap. totală [kWh]	Celulă [Ah]	Masă [kg]	Autonomie [km]	Preț [k€]
Zoe ZE 2012	25.92	22	36	280	210	5–7
Zoe ZE 40 2016	44.1	41	63	305	300	8–12
Zoe ZE 50 2019	54.7	52	78	326	395	13–38
Leaf 2010	22	24	32.5	294	150	4–7
Leaf 2015	27	30	43	315	200	8–10
Leaf 2017	36	40	56.3	303	250	11–20
Leaf 2019	56	62	56.3	410	385	20–39

Analiza comparativă pe modelele timpurii demonstrează limitările sistemelor fără management termic activ. Datele de teren pentru vehiculele Nissan Leaf (generațiile de 24 kWh și 30 kWh) indică o dispersie largă a SoH la kilometraje similare; absența răcirii cu lichid a forțat celulele să funcționeze la temperaturi ridicate, accelerând formarea stratului pasivant și pierderea de capacitate [8]. În plus, limitarea tensiunii maxime de încărcare per celulă influențează direct numărul de cicluri: reducerea tensiunii de cut-off de la 4,20 V la 4,05 V poate tripla numărul de cicluri până la EOL, motiv pentru care producătorii aplică buffere software pentru a restricționa adâncimea de descărcare (DOD) și încărcarea maximă.

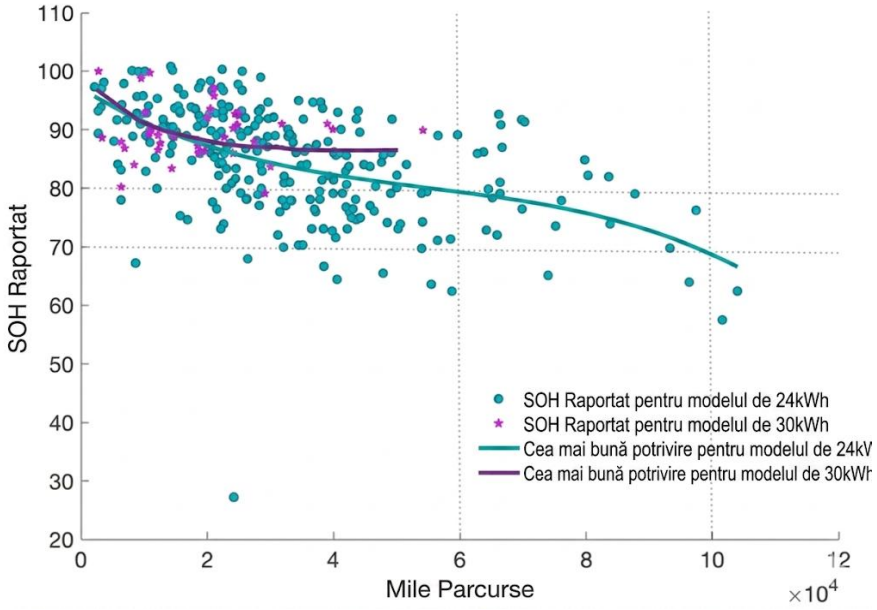


Figura 5.8. Nissan Leaf – SoH măsurat pe teren.

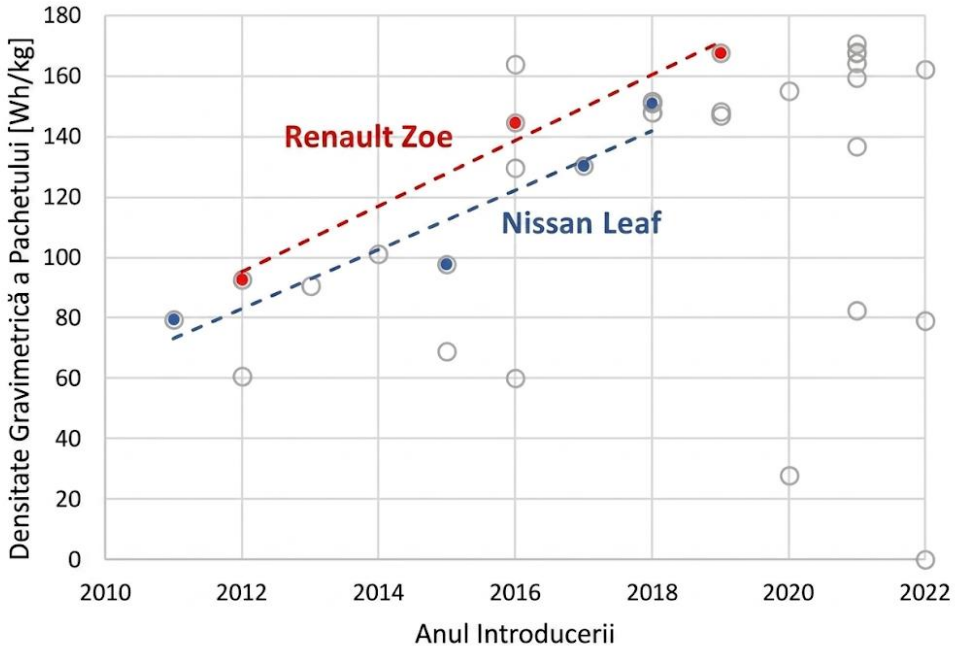


Figura 5.9. Densitatea gravimetrică (Wh/kg) în funcție de anul producției.

5.4. Concluzii

Durata de viață a bateriilor nu este determinată exclusiv de numărul de cicluri sau de kilometrii parcurși, ci și de acțiunea cumulată a unor factori de stres (variații termice, niveluri ale curenților de încărcare/descărcare, strategia de echilibrare). Evoluția sistemelor BMS a transformat vehiculul electric dintr-o platformă vulnerabilă la degradare accelerată într-un sistem de stocare robust și controlabil. Prin monitorizarea precisă a SoC și SoH și prin tehnici eficiente de echilibrare, se menține o capacitate utilă ridicată pe o durată extinsă — condiție esențială pentru integrarea bateriei în aplicații energetice bidirecționale de tip V2G și V2X.

Capitolul 6. Integrarea vehiculelor electrice prin tehnologiile V2X și V2G

6.1. Context, conectorul de încărcare și standardele de comunicare bidirecțională

Timpul mediu de staționare al unui autovehicul depășește frecvent 90 % din durata sa de viață. În cazul vehiculelor electrice, această perioadă reprezintă o fereastră de oportunitate, deoarece capacitatea energetică a bateriei rămâne subutilizată [51]. Conceptul Vehicle-to-Grid (V2G) a fost dezvoltat pentru a transfera surplusul energetic către rețea, atenuând vârfurile de sarcină și oferind servicii auxiliare pentru stabilitatea sistemului [1]–[3].

Trecerea de la un flux unidirecțional la unul bidirecțional implică modificări de arhitectură la nivelul convertorului de bord, protocoale de comunicare front-end și back-end și stații de încărcare capabile să inverseze sensul de tranzit al puterii [3]. Realimentarea bateriei utilizează două topologii: încărcarea în curent alternativ (AC) și încărcarea în curent continuu (DC), aceasta din urmă ocolind redresorul de bord (OBC). Interfațarea pentru servicii V2G necesită un protocol de comunicație de nivel înalt; standardele dominante sunt CHAdeMO și Combo CCS [53], iar transferul instrucțiunilor între EV, EVSE și operatori este reglementat de norma ISO 15118 [11], [12]. Comunicația fizică se bazează pe PLC suprapus pe liniile de control, cu mesaje XML codificate prin metoda EXI într-un model securizat client-server [12], [52].

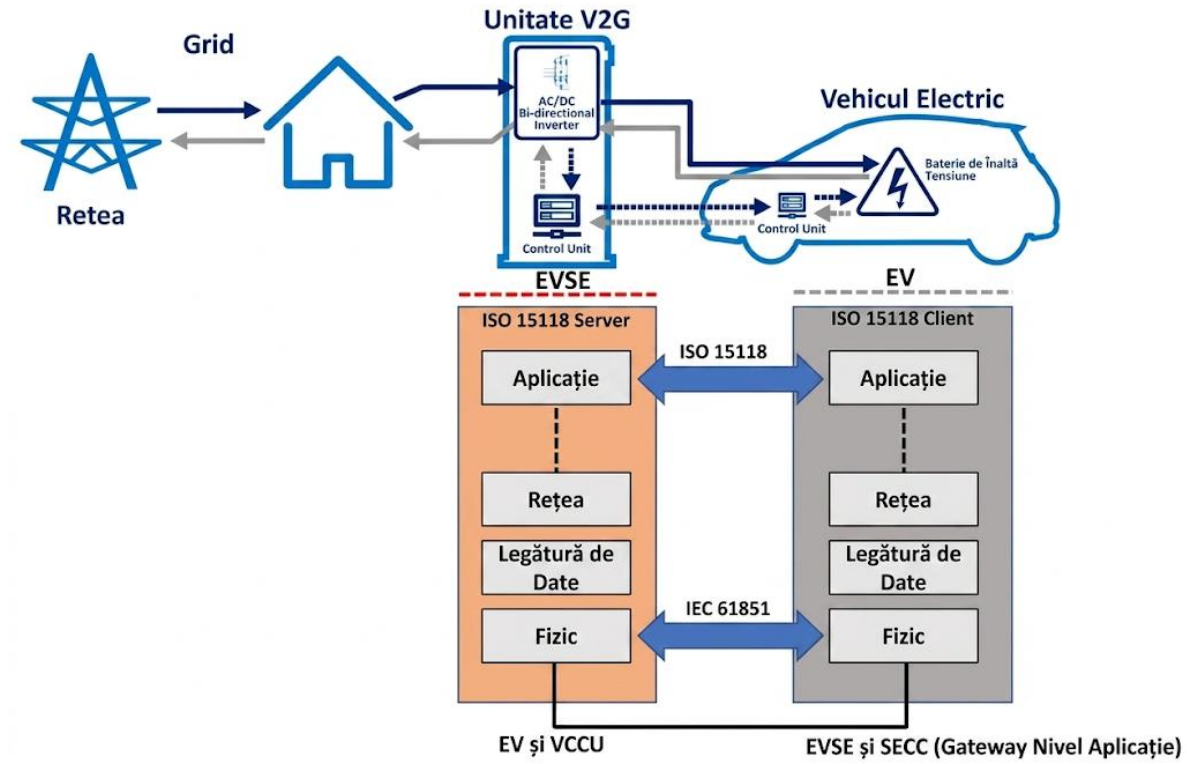


Figura 6.1. Arhitectura de încărcare a VE și V2G cu standardele de comunicare relevante.

6.2. Validări V2G, integrarea cu sisteme fotovoltaice și analiza tehnico-economică

Fezabilitatea schimbului bidirecțional de date și energie a fost demonstrată extensiv în literatură. Arhitecturile de testare moderne se bazează pe standardul Combo CCS de tip 2, folosind unități de control (VCU) pentru protocolul ISO 15118-2 și emulatoare de baterii [1],

[54]. Studiile arată că, în timpul tranzitului bidirecțional, invertoarele pot menține o undă de tensiune stabilă de cca 230 Vrms în opoziție de fază cu curentul injectat, cu o distorsiune armonică totală (THD) a curentului de descărcare de regulă sub 5 %, în conformitate cu IEC-1000-3-6 [52]. Eficiența procesului de descărcare V2G depinde de SoC, atingând randamente de peste 97 % pentru un SoC de 50 % la puteri între 4,8 și 9,6 kW [2].

Expansiunea generării fotovoltaice (PV) distribuite a transformat sectorul rezidențial, programele de sprijin (precum „Casa Verde Fotovoltaice” din România) încurajând adoptarea acestor tehnologii [55]. Instalațiile rezidențiale au de regulă o putere de 3–6 kWp [56]. Natura intermitentă a energiei solare generează un decalaj între producție (maximă la amiază) și consum (maxim seara) [51]; comportamentul panourilor este descris prin modelul curent-tensiune (I-V), care permite estimarea puterii de ieșire în funcție de radiația solară, temperatură, aria panoului și eficiența de conversie [57].

Optimizarea autoconsumului necesită o capacitate de stocare de 5–15 kWh, bazată în general pe baterii LiFePO4 [58], al cărei cost rămâne un factor limitant. Bateriile vehiculelor electrice oferă capacități net superioare (40–100 kWh), interfațarea cu rețeaua casei realizându-se printr-o stație de încărcare bidirecțională, subordonată algoritmilor de protecție ai BMS-ului mașinii.

Analiza economică relevă diferențe semnificative: stocarea rezidențială pe bază de litiu costă de regulă 600–1000 €/kWh [59], astfel încât un sistem de 5–15 kWh poate necesita 3000–15000 €. În contrast, un vehicul electric rulat cu o capacitate utilă reziduală de cca 30 kWh, achiziționat la un preț mediu de 15000 €, conduce la un cost implicit al stocării de cca 500 €/kWh, comparabil sau chiar inferior soluțiilor staționare, cu avantajul mobilității. Totuși, implementarea V2H/V2G presupune achiziția infrastructurii de încărcare bidirecțională, una dintre principalele bariere de adoptare din cauza costurilor ridicate [60], [61].

$Tc = Ta + R \cdot tc$ $P = f(R, A, \eta)$ — relațiile I-V (6.1)–(6.8) descriu funcționarea panoului PV

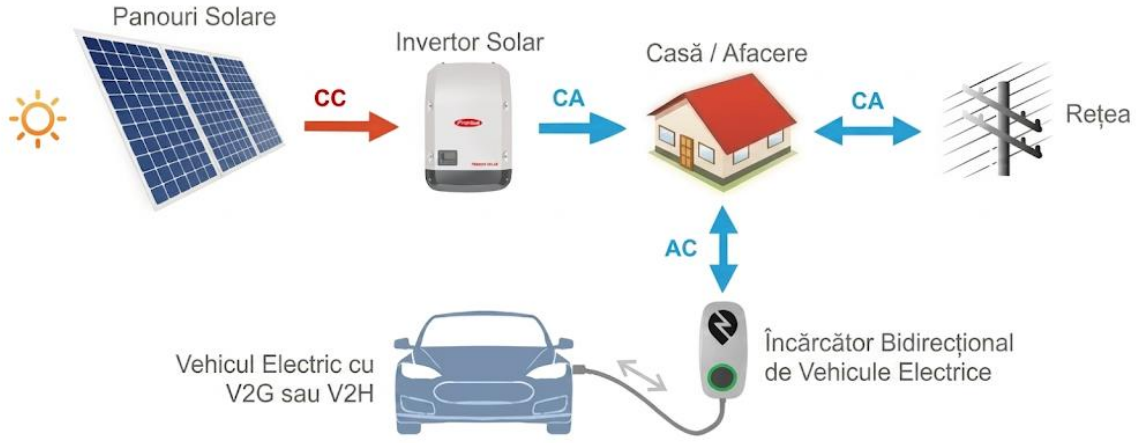


Figura 6.2. Integrarea conceptuală a generării fotovoltaice, a vehiculului electric și a rețelei inteligente într-un ecosistem rezidențial.

6.3. Concluzii

Trecerea de la consumator pasiv la actor energetic activ este dependentă de integrarea protocoalelor de comunicație complexe (ISO 15118). Literatura a demonstrat fezabilitatea tehnică a descărcării controlate a energiei, cu pierderi minime și distorsiuni armonice în limitele normativelor. Din perspectivă matematică și economică, stocarea energiei fotovoltaice rezidențiale direct în bateriile EV reprezintă o alternativă viabilă la bateriile staționare, costul implicit pe kWh extras dintr-un vehicul second-hand fiind extrem de competitiv. Pentru ca acest flux să nu afecteze drastic durata de viață a pachetului Li-Ion, hardware-ul bidirecțional extern trebuie să comunice permanent cu BMS-ul vehiculului.

Capitolul 7. Proiectarea, realizarea practică și simularea unui sistem BMS cu funcții V2X

7.1. Introducere și echipamente utilizate

Sistemele BMS asigură operarea sigură a pachetelor de baterii litiu-ion, menținând celulele în limite predefinite prin monitorizarea continuă a tensiunii, curentului și SoC și prin mecanisme de protecție. Tradițional, arhitecturile BMS sunt proiectate pentru un flux energetic unidirecțional. Creșterea ponderii vehiculelor electrice a accelerat interesul pentru transferul bidirecțional, sub umbrela conceptului V2X (V2G, V2H, V2L) [62], [7]. Întrucât accesul experimental la tehnologiile auto proprietare este limitat, capitolul investighează utilizarea unui BMS comercial de 48 V, integrat cu un pachet Li-Ion de 14 celule (18650) și un invertor bidirecțional, pentru a evalua experimental funcțiile esențiale (monitorizare, protecție, echilibrare) în susținerea unui transfer energetic controlat.

Pachetul de stocare utilizează celule cilindrice 18650 (configurație 14S, compatibilă cu nivelul nominal de 48 V), selectate pentru densitatea energetică favorabilă [63]. Conversia DC-AC este realizată de un invertor Mean Well NTS-450, care generează o undă sinusoidală pură și integrează protecții proprii [64]. Supervizarea este asigurată de un BMS 14S comercial, ale cărui funcții de bază (protecție la supraîncărcare/supradescărcare și echilibrare pasivă) sunt suficiente pentru operarea bidirecțională de mică putere.

Tabelul 7.1. Specificațiile principale ale sistemului de gestionare a bateriei

Parametru	Valoare
Configurație celule	14S (14 celule în serie)
Tensiune nominală pachet	48 V
Tensiune maximă de încărcare	58,8 V
Tensiune minimă de descărcare	44,8 V
Curent continuu maxim	20 A
Echilibrare celule	Pasivă / Activă (în funcție de model)
Funcții de protecție	Supraîncărcare, supradescărcare, supracurent, scurtcircuit, temperatură
Estimare SoC	Da

7.2. Arhitectura sistemului și modelarea/simularea V2L în Matlab/Simulink

Configurația electrică conectează bateria, BMS-ul, invertorul și elementele de protecție. Conexiunile individuale ale celulelor sunt direcționate către BMS prin cabluri de sensing, permițând detecția dezechilibrelor; BMS-ul este înseriat pe ambele căi (încărcare și descărcare). Pe linia principală de curent continuu s-au inserat o siguranță fuzibilă de 16 A și un separator manual pentru izolare galvanică rapidă, iar la ieșirea AC a fost atașată o sarcină de probă (cca 45 W).

Pentru validarea comportamentului dinamic înaintea testelor fizice, arhitectura a fost modelată în Matlab/Simulink (biblioteca Simscape Electrical) [19], [65]. Pachetul a fost modelat printr-un bloc Lithium-Ion (14S, 51,8 V), etajul de inversie printr-o punte H monofazată cu MOSFET-uri comandate PWM la 10 kHz, iar ieșirea a fost decuplată printr-un

filtru trece-jos LC. Pentru captarea precisă a fiecărei comutații s-a utilizat blocul powergui în domeniu discret, cu pas de eșantionare strâns. Două intervenții de rafinare au fost necesare: modelarea condensatorului de filtrare cu rezistență serie echivalentă (ESR) pentru eliminarea buclei algebrice și a curentului teoretic infinit, respectiv scalarea capacității pentru extragerea curbei SoC într-o fereastră de simulare redusă, păstrând validitatea ecuațiilor diferențiale.

Simularea a evidențiat capacitatea etajului de a susține o tensiune sinusoidală stabilă pe sarcina AC, cu un regim tranzitoriu scurt la inițializare. Cel mai important rezultat îl constituie forma curentului de descărcare pe magistrala de curent continuu: invertorul nu absoarbe un curent neted, ci generează pulsații (riplu) de înaltă frecvență de amplitudine semnificativă, ceea ce fundamentează teoretic stresul electric la care este supusă bateria în regim V2L și demonstrează necesitatea unui BMS capabil să filtreze aceste variații pentru a nu declanșa fals protecțiile de supracurent. Graficul SoC prezintă o pantă de descărcare coerentă, confirmând funcționalitatea algoritmului de Coulomb counting și bilanțul energetic al sistemului.

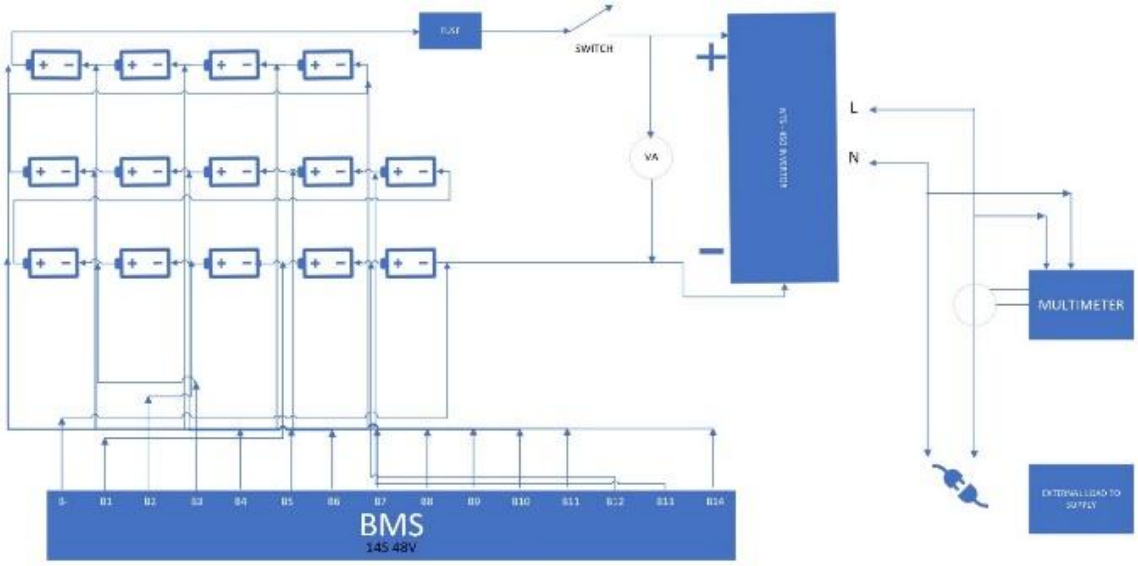


Figura 7.1. Schema de conexiuni electrice a instalației experimentale.

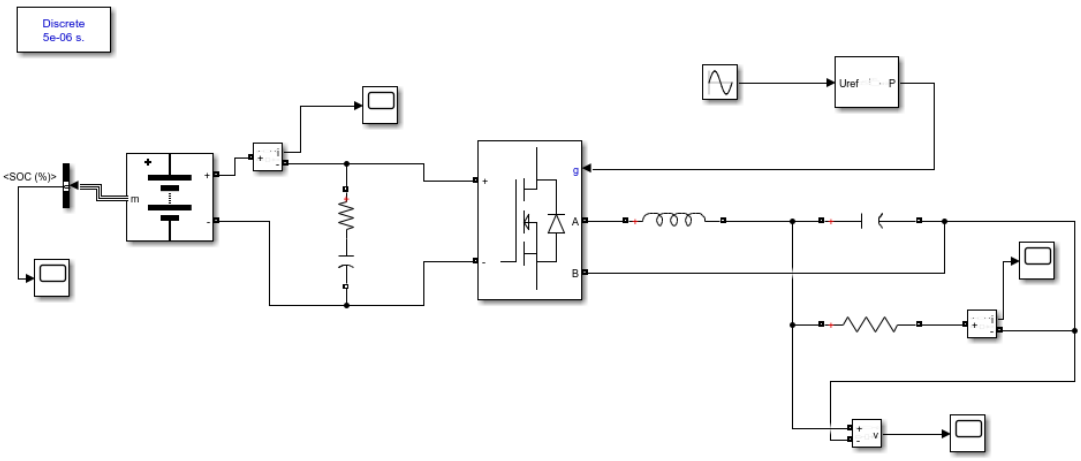


Figura 7.2. Schema bloc a modelului de simulare V2L implementat în Matlab/Simulink.

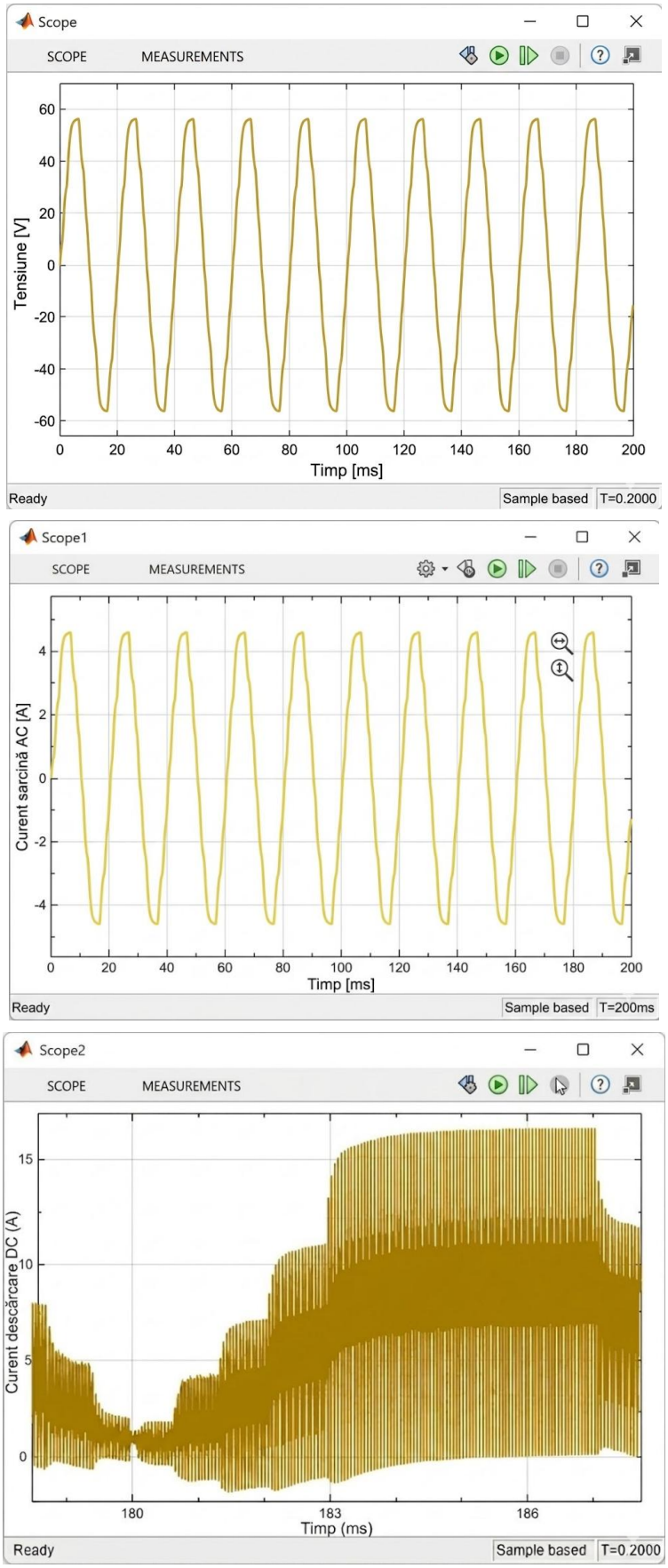


Figura 7.3. Formele de undă simulate: regimul tranzitoriu și stabilizat pe sarcina AC (primele două grafice) și riplul curentului DC absorbit (al treilea grafic).

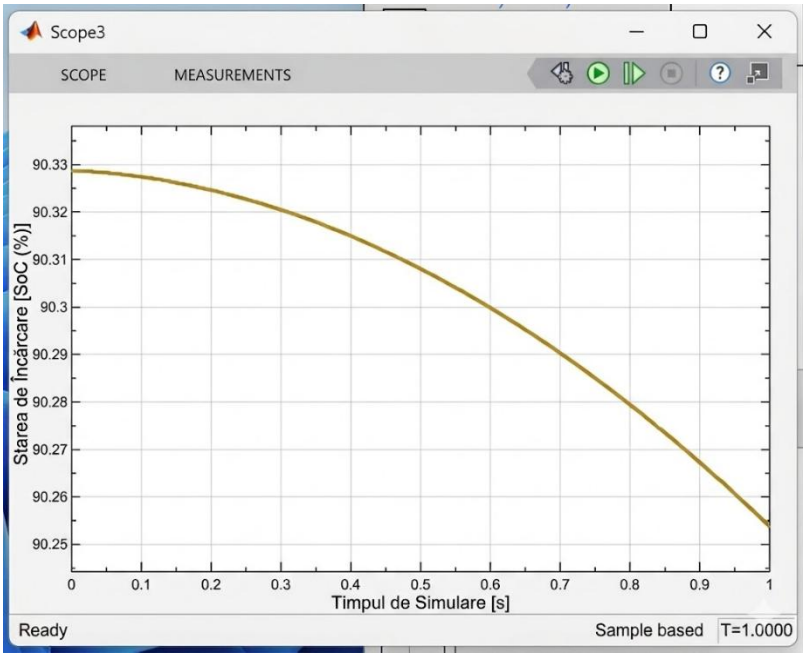


Figura 7.4. Variația estimată a Stării de Încărcare (SoC) sub sarcină constantă de 100 W.

7.3. Rezultate experimentale și analiza performanței

Testele au constat în cicluri controlate de încărcare-descărcare. Încărcarea a fost executată până la pragul de protecție al BMS-ului de 58,8 V (4,2 V/celulă), iar descărcarea s-a realizat prin alimentarea sarcinii AC de 45 W, oprindu-se automat la 44,8 V (3,2 V/celulă), confirmând declanșarea corectă a protecției UVP.

Tabelul 7.2. Dispersia tensiunilor celulelor înainte și după echilibrare

Condiție de funcționare	U max celulă [V]	U min celulă [V]	Diferență [mV]
Înainte de echilibrare	4,11	4,01	100
După echilibrare	4,07	4,04	30
În timpul descărcării	3,46	3,42	40

Măsurătorile inițiale au indicat o dispersie moderată a tensiunilor pe celule (dezechilibru intrinsec de 100 mV). Prin ciclări succesive, algoritmul de echilibrare pasivă al BMS-ului s-a activat automat, disipând excesul de energie pe rezistoarele de șunt [9]. Dispersia s-a redus de la 100 mV la 30 mV la încărcare maximă, confirmând restabilirea uniformității. Evoluția convergenței tensiunilor validează principiul de decizie algoritmică al BMS-ului, esențial în atenuarea degradării premature cauzate de dezechilibre în aplicațiile V2X.

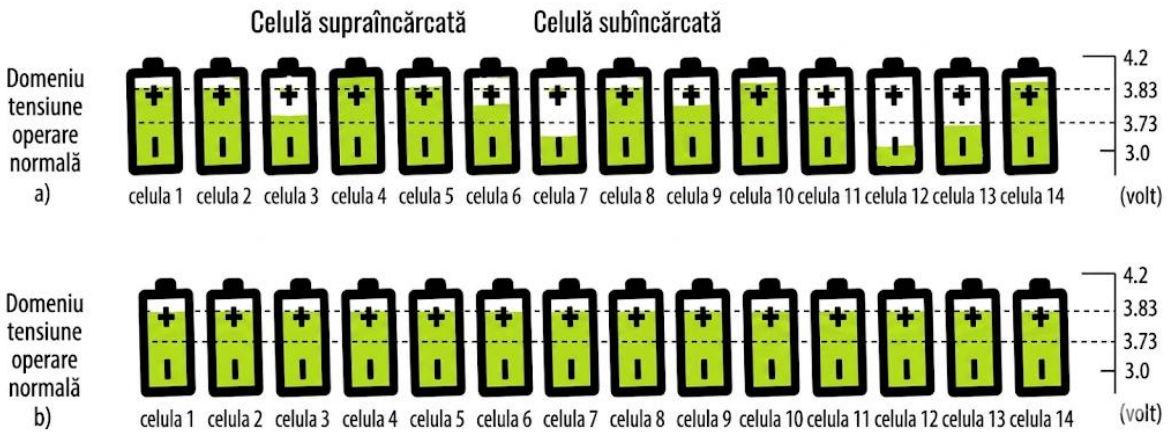


Figura 7.5. Tehnica de echilibrare a celulelor.

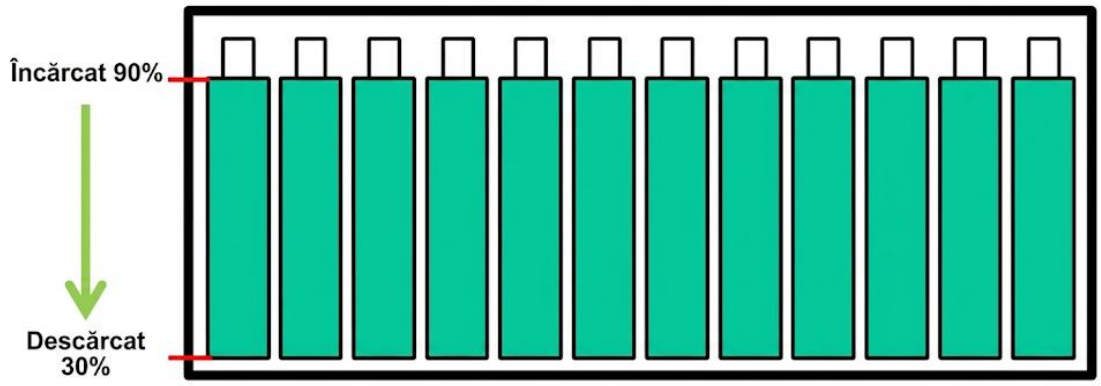


Figura 7.6. Pachet de baterii complet încărcat.

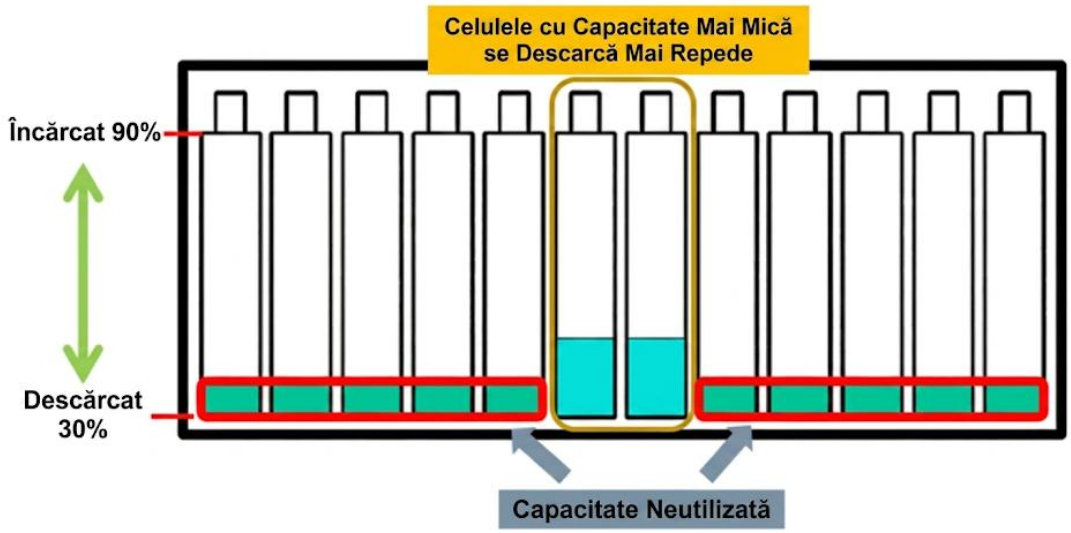


Figura 7.7. Pachet de baterii la capacitate maximă.

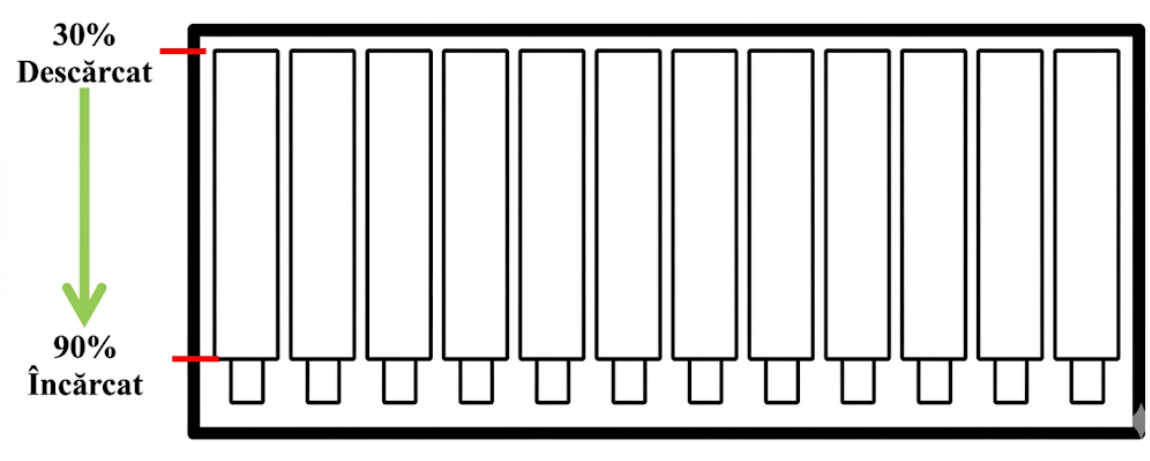


Figura 7.8. Descărcare completă cu echilibrare activă.

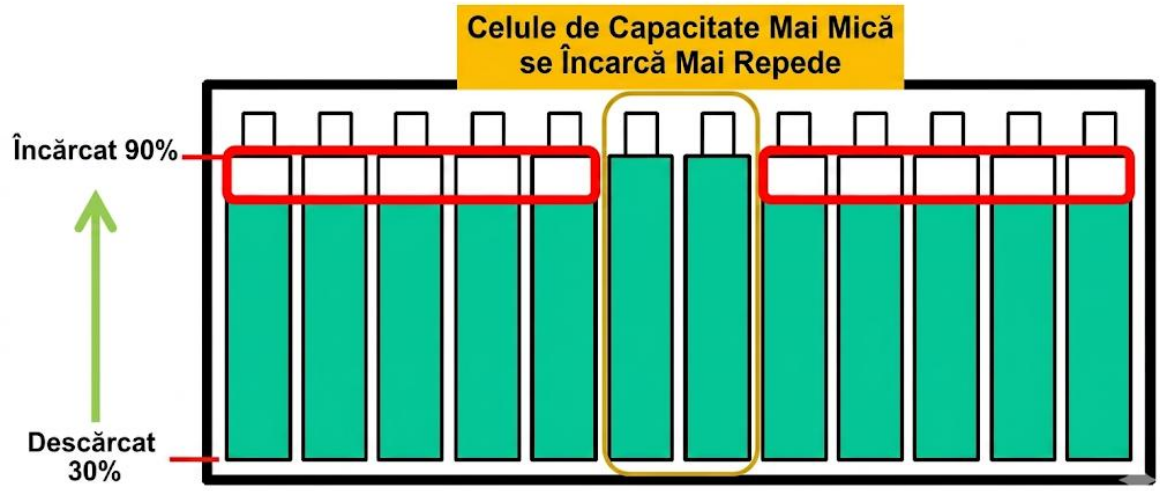


Figura 7.9. Încărcare fără echilibrare.

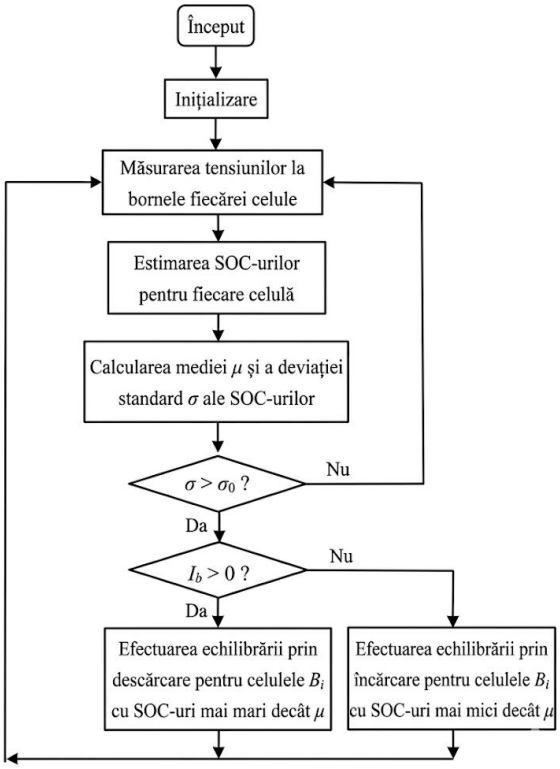


Figura 7.10. Diagrama de flux a metodei de echilibrare activă a celulelor.

7.4. Concluzii

Ansamblul practic validează ipoteza cercetării: un BMS de tip comercial, neproiectat specific pentru industria auto, poate superviza eficient și în siguranță un transfer de energie bidirecțional la putere scăzută (sub 100 W) [62]. Instrumentația de laborator a demonstrat reacția corectă la pragurile critice (supratensiune/subtensiune) și o îmbunătățire vizibilă a echilibrării pachetului 14S (diferențe inter-celulare reduse la 30 mV). Absența protocoalelor de comunicație complexe și a sincronizării avansate de rețea limitează transferul la aplicații de tip V2L, însă abordarea demonstrează că fundamentele interacțiunii energetice pot fi implementate fiabil cu hardware de cost redus. Validarea prin simulare în Matlab și convergența rezultatelor fizice atestă robustețea modelului, închizând ciclul de cercetare al tezei.

Capitolul 8. Concluzii generale, contribuții originale și perspective

8.1. Concluzii generale

Prezenta lucrare a abordat o temă de mare actualitate în contextul tranziției energetice, și anume optimizarea ecosistemului vehiculelor electrice și integrarea acestora în rețele inteligente prin tehnologiile Vehicle-to-Everything (V2X). Demersul de cercetare a urmat o structură logică și coerentă, pornind de la analiza teoretică a principalelor componente hardware implicate — motorul de tracțiune, filtrele analogice și rețelele de adaptare a impedanței — și continuând cu implementarea practică și simularea unui sistem de stocare și transfer bidirecțional al energiei.

Principalele concluzii care se desprind din această lucrare sunt:

- Analiza regimului dinamic al mașinilor electrice este vitală. Saturația magnetică și regimurile deformante introduse de comutația invertoarelor generează armonici care solicită termic și electric bateria, impunând necesitatea unor etaje de filtrare riguroase.
- Generarea parametrilor (Z, Y, T, S) și adaptarea impedanțelor (în special prin utilizarea diagramei Smith) reprezintă o etapă critică pentru asigurarea unui transfer maxim de putere și a unei comunicații de înaltă frecvență fără erori, absolut necesară în standardele de încărcare inteligente (ex. ISO 15118).
- Sistemul de Management al Bateriei (BMS) a evoluat de la un simplu modul de protecție la un element decizional complex. Metodele avansate de estimare a stărilor interne, corelate cu echilibrarea activă și pasivă a celulelor, limitează degradarea bateriilor Li-Ion, făcându-le apte pentru ciclări suplimentare în aplicații V2X.
- Analiza tehnico-economică și modelarea matematică au demonstrat că utilizarea capacității reziduale a bateriilor din vehiculele electrice (inclusiv cele de pe piața second-hand) oferă un cost per kWh de stocare extrem de competitiv comparativ cu bateriile staționare dedicate, facilitând integrarea optimă a energiei fotovoltaice rezidențiale.
- Implementarea practică și simularea (Matlab/Simulink) a unui montaj BMS (14S) cuplat cu un pachet de celule 18650 și un invertor bidirecțional au validat fezabilitatea transferului de putere (modul V2L); BMS-ul protejează eficient celulele în timpul descărcării către o sarcină externă, confirmând că interfațarea V2X poate fi implementată cu succes.

8.2. Contribuții originale

Principalele contribuții originale aduse de autor în prezenta teză de doctorat sunt:

- Realizarea unei punți logice și matematice între teoria fundamentală a circuitelor analogice (cuadripoli, filtre, adaptarea impedanțelor prin parametri S) și aplicațiile moderne de management al energiei în ecosistemul vehiculelor electrice;
- Investigarea efectului saturației magnetice asupra performanțelor motoarelor de inducție, prin raportare la schema echivalentă în Π, în care inductanța de magnetizare

este reprezentată printr-o bobină neliniară comandată în curent, iar rezistorul rotorului printr-un element variabil în timp, ceea ce a permis analiza funcționării motorului în regim staționar;

- Dezvoltarea și utilizarea unui cadru de simulare bazat pe programele ACAP, CSAP și SPICE, construite pe baza ecuațiilor nodale modificate, care oferă posibilitatea efectuării analizei Fourier pentru toate formele de undă de tensiune și curent, evidențiind armonicile superioare ce determină creșterea pierderilor și scăderea performanțelor (randament, factor de putere);
- Propunerea și dezvoltarea unor proceduri originale de înaltă performanță pentru generarea parametrilor circuitelor cuadripolare liniare și ai circuitelor neliniare liniarizate pe porțiuni, precum și ai filtrelor analogice, cu aplicabilitate directă în analiza, modelarea și proiectarea circuitelor analogice;
- Realizarea unor programe interactive dedicate calculului simbolic al funcțiilor de circuit (CSAP și TFSYG), care permit formularea automată a ecuațiilor nodale modificate în diverse forme de reprezentare, generarea funcțiilor de circuit, analiza în c.c., c.a. și în domeniul operațional, determinarea polilor și zerourilor și construirea matricelor asociate metodei nodale modificate;
- Implementarea unei metodologii hibride pentru generarea funcțiilor de transfer, bazată atât pe ecuații nodale modificate (programele ACAP, CSAP și TFSYG), cât și pe ecuații de stare generate cu programul SYSEG, completată prin utilizarea mediilor MAPLE, ANSYS și MATLAB pentru procesarea, analiza și validarea rezultatelor;
- Prezentarea pe larg a proiectării și construcției circuitelor de adaptare a impedanțelor, calculând cu mare acuratețe valorile parametrilor (bobine și condensatoare) utilizate în aceste circuite;
- Elaborarea unui dispozitiv de urmărire a punctului de putere maximă, utilizat pentru a extrage puterea maximă de la un panou solar și a o transfera eficient către baterii, rețea sau alte sarcini; teorema transferului de putere maximă se aplică conexiunii „în amonte” (panoul solar), în timp ce conexiunea „în aval” este o conexiune cu punte de impedanță, ce emulează o sursă de înaltă tensiune și rezistență scăzută pentru maximizarea eficienței;
- Demonstrarea faptului că procedurile de adaptare bazate pe elemente reactive pot fi implementate cu ușurință în mediile MAPLE sau MATLAB și că esența adaptării constă în înțelegerea modului în care componentele deplasează impedanța pe diagrama Smith, fără a fi necesare valori numerice exacte ale componentelor reale;
- Analiza comparativă a impactului algoritmilor BMS asupra duratei de viață a bateriilor, fundamentată pe studii de caz din piața reală a vehiculelor electrice (de ex. influența managementului termic la Renault Zoe vs. Nissan Leaf);
- Dezvoltarea unui model matematic și a unei analize tehnico-economice detaliate privind integrarea sistemelor fotovoltaice rezidențiale cu bateriile vehiculelor electrice,

demonstrând viabilitatea stocării mobile (V2H/V2G) comparativ cu soluțiile staționare (LiFePO4);

- Proiectarea, asamblarea și testarea unui montaj fizic de stocare și conversie a energiei (pachet Li-Ion, BMS comercial, invertor), demonstrând practic capacitatea Vehicle-to-Load (V2L) și comportamentul de echilibrare a celulelor la nivel de laborator;
- Dezvoltarea unui model de simulare avansat în Matlab/Simulink (Simscape) care reproduce comportamentul dinamic al montajului fizic sub sarcină, permițând analiza formelor de undă, a regimului tranzitoriu și a solicitărilor de tip riplu asupra bateriei;
- Selectarea cu deosebită atenție a tuturor exemplelor prezentate în lucrare, astfel încât să ilustreze cât mai exact acuratețea procedurilor și programelor de calcul elaborate în teză.

8.3. Lista lucrărilor publicate

Această listă cuprinde lucrările publicate în timpul stagiului doctoral, cu subiecte din tematica tezei, la care doctorandul este autor sau co-autor:

- **Mihai ROTARU**, Georgiana Rezmeriță, Ionuț Cătălin Mihăilă, Mihaela Popescu, Mihai Iordache, „Presentation of the Smith Chart and Applications to Analog Circuit Analysis”, Proceeding of the 13th International Symposium Advanced Topics in Electrical Engineering – ATEE'23, 23–25 martie 2023, București, România, Editura Politehnica Press, DOI: 10.1109/ATEE58038.2023.10108217.
- Mihaela Grib, Maria Lavinia Bobaru, Mihai Iordache, Marilena Stănculescu, Georgiana Rezmeriță, **Mihai ROTARU**, „The Use of Smith Diagram for Impedance Matching”, Proceedings of the 10th International Conference on Modern Power Systems (MPS 2023), 21–23 iunie 2023, DOI: 10.1109/MPS58874.2023.10187467.
- Adrian-Florian Georgescu, Dragoș Niculae, Mihai Iordache, Marilena Stănculescu, Ana-Maria Bumbeneci, Lavinia Bobaru, Georgiana Zainea and **Mihai Rotaru**, „Automatic Procedure and the Use of the Smith Chart in Impedance Matching in Analog Circuits”, Electronics 2025, 14, 2746, publicat 8 iulie 2025, WOS:001539842500001, pp. 1–17.
- Ovidiu Lăudatu, Marilena Stănculescu, Mihai Iordache, Lavinia Bobaru, Dragoș Niculae, **Mihai Rotaru**, „Design Considerations for Switched-Mode Power Supplies with Capacitive Coupling”, Proc. of the 16th International Conference on Applied and Theoretical Electricity (ICATE 2024), 24–26 octombrie, DOI: 10.1109/ICATE62934.2024.10748638, pp. 1–6.
- Mihai Iordache, Marilena Stănculescu, Lavinia Bobaru, Dragoș Niculae, Sorin Deleanu, Anton Anastasie Moscu, Adrian Georgescu, **Mihai Rotaru**, „Using the SSEMGP – Semi-State Equation Matrix Generation Program for Transfer Function Generation in Analog Circuits with SISO and MIMO”, 2025 International Conference on Electromechanical and Energy Systems (SIELMEN), 16–18 octombrie 2025, DOI: 10.1109/SIELMEN67352.2025.11260820, WOS:001669739200039, pp. 1–30.

- Adrian Georgescu, Mihai Iordache, Dragoș Niculae, Lavinia Bobaru, Georgiana Rezmeriță, **Mihai Rotaru**, Ana-Maria Tudor, „Generation of Two-Port Circuit and Filter Parameters”, Proceeding of the 14th International Symposium Advanced Topics in Electrical Engineering – ATEE'25, 9–11 octombrie 2025, București, România, Editura Politehnica Press, pp. 373–377, DOI: 10.1109/ATEE66006.2025.11299872.
- **Mihai Rotaru**, Adrian Georgescu, Dragoș Niculae, Georgiana Zainea, Mihai Iordache and Steliana Pușcașu, „Conversions Among Z, Y, H, F, T, and S Parameters, Which are Highly Beneficial for the Analysis of Two-Port Circuits and Filters”, Energies 2026, 15(2), 1344, WOS:001670332900001, pp. 1–23.
- **Mihai Rotaru**, Adrian-Florian Georgescu, Mihai Iordache, Dragoș Niculae, Steliana Pușcașu, Georgiana Zainea, „Analysis of the Asynchronous Motor in Steady-State Regime When Taking into Consideration the Magnetization Characteristic and the Variation of the Rotor Resistance with Slip”, Electric Machines, Materials, and Drives – Present and Trends (APME/SME'25), Ediția XXI, 28 noiembrie 2025, UNSTP București.

8.4. Perspective de dezvoltare ulterioară

Cercetarea deschide noi direcții de investigare în domeniul integrării vehiculelor electrice în rețelele inteligente:

- Dezvoltarea unor algoritmi BMS predictivi, bazați pe Machine Learning, capabili să optimizeze profilul de încărcare/descărcare în funcție de prognoza producției de energie fotovoltaică și de tarifele dinamice ale pieței de energie;
- Extinderea modelului de simulare Matlab/Simulink pentru a include flote de vehicule (agregatoare V2G), analizând impactul acestora la nivel macro asupra stabilității rețelei de distribuție;
- Investigarea unor tehnologii emergente de baterii (ex. Solid-State) și adaptarea modelelor de echilibrare și management termic pentru creșterea siguranței și a densității de putere în aplicațiile V2X;
- Aprofundarea integrării hardware a stațiilor de încărcare bidirecționale direct cu invertoarele hibride rezidențiale, reducând costurile de instalare și conversie.

BIBLIOGRAFIE SELECTIVĂ

[1] Y. Cao et al., „Smart Grid Integration of Electric Vehicles”, IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 3, nr. 3, 2012.
[2] W. Kempton, J. Tomić, „Vehicle-to-grid power fundamentals: Calculating capacity and net revenue”, Journal of Power Sources, vol. 144, nr. 1, 2005.
[3] C. Guille, G. Gross, „A conceptual framework for the vehicle-to-grid (V2G) implementation”, Energy Policy, vol. 37, nr. 11, 2009.
[4] L. Lu, X. Han, J. Li, J. Hua, M. Ouyang, „A review on the key issues for lithium-ion battery management in electric vehicles”, Journal of Power Sources, vol. 226, pp. 272–288, 2013.
[5] S. S. Katoch, M. Eswaramoorthy, „A review on current status of battery management system for electric vehicles”, IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, vol. 912, 042005, 2020.
[6] K. W. E. Cheng, B. P. Divakar, H. Wu, K. Ding, H. F. Ho, „Battery-Management System (BMS) and SOC Development for Electrical Vehicles”, IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 60, nr. 1, pp. 76–88, 2011.
[7] H. Rahimi-Eichi, U. Ojha, F. Baronti, M. Chow, „Battery Management System: An Overview of Its Application in the Smart Grid and Electric Vehicles”, IEEE Industrial Electronics Magazine, vol. 7, nr. 2, pp. 4–16, 2013.
[8] P. Keil, A. Jossen, „Aging of Lithium-Ion Batteries in Electric Vehicles”, Journal of The Electrochemical Society, vol. 163, nr. 9, 2016.
[9] T.-C. Bibirică, M. Iordache, „Intelligent balancing of series cells in battery management systems”, U.P.B. Sci. Bull., Series C, vol. 80, Iss. 4, 2018.
[10] C. T. Bibirică, M. Iordache, S. N. Ciobîcă, „State of Charge Estimation for Lithium-Ion Batteries”, Advanced Topics in Electrical Engineering (ATEE), IEEE, 2019.
[11] ISO 15118-1:2019, Road vehicles — Vehicle to grid communication interface — Part 1: General information and use-case definition, International Organization for Standardization, Geneva, Elveția.
[12] ISO 15118-2:2014, Road vehicles — Vehicle to grid communication interface — Part 2: Network and application protocol requirements, International Organization for Standardization.
[13] M. Rotaru, A.-F. Georgescu, M. Iordache, „Analysis of the Induction Motor in Steady-State Behavior”, MDPI Energies, 2023.
[14] M. Iordache, H. S. Popescu, I. Vlad and M. F. Staniloiu, „ACAP – Analog Circuit Analysis Program”, 2021 12th International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering (ATEE), Bucharest, Romania, 2021, pp. 1–6.
[15] M. Stănculescu, S. Deleanu, D. Sanatescu, A. Ionescu, A. Moscu and L. Bobaru, „CSAP and TFSG – Circuit Symbolic Analysis Programs and Transfer Function SYmbolic Generation”, 2019 International Conference on Electromechanical and Energy Systems (SIELMEN), Craiova, Romania, 2019, pp. 1–6.
[16] A. Vladimirescu, SPICE, Editura Tehnică, București, 1999.
[17] M. Iordache, Bazele electrotehnicii – Vol. 1 și 2, Editura Matrix ROM, București, 2008.
[18] M. Iordache, L. Mandache, Analiza circuitelor analogice neliniare, Editura Politehnica Press, București, 2010.
[19] MathWorks, MATLAB and Simulink User's Guide, R2023a, The MathWorks, Inc., Natick, MA, SUA.
[20] M. Iordache, S. Deleanu, C. Curteanu, N. Galan, A. A. Moscu, „SYSEG – SYmbolic State Equation Generation”, Proc. of the 11th International Conference on Electromechanical and Power Systems, SIELMEN 2017.

[21] M. Rotaru, M. Iordache et al., „Presentation of the Smith Chart and Applications to Analog Circuit Analysis”, MDPI, 2023.
[22] P. H. Smith, Electronic Applications of the Smith Chart, McGraw-Hill, 1969.
[23] M. Iordache, Teoria Circuitelor Electrice, Curs universitar, UPB, Facultatea de Inginerie Electrică.
[24] M. Iordache, Lucia Dumitriu, Computer-Aided Simulation of Analogue Circuits – Algorithms and Computational Techniques, Editura POLITEHNICA Press, Vol. I and Vol. II, Bucharest 2014.
[25] R. M. Nelms, J. D. Irwin, Basic Engineering Circuit Analysis, 11th ed., Wiley, 2015.
[26] A. F. Schwarz, „Computer-aided design of microelectronic circuits and systems. Fundamentals, Methods and Tools”, Academic Press, New York, 1987.
[27] J. Pedra, F. Corcoles, „Estimation of Induction Motor Double-Cage Model Parameters from Manufacturer Data”, IEEE Transactions on Energy Conversion, June 2004.
[28] C. A. Desoer, E. S. Kuh, Basic Circuit Theory, McGraw-Hill, 1969.
[29] Mihai Iordache, Lucia Dumitriu, „Generation of the Transfer Functions for MIMO Systems”, Chapter 4, în Design of Analog Circuits through Symbolic Analysis, Bentham Science Publishers, 2012.
[30] M. Iordache, Symbolic, Numeric-Symbolic and Numeric Simulation of Analog Circuits – User Guides, MATRIX ROM, Bucharest, 2015.
[31] L. O. Chua, C. A. Desoer, E. S. Kuh, Linear and Nonlinear Circuits, McGraw-Hill, 1987.
[32] C. I. Mocanu, Teoria circuitelor electrice, Editura Didactică și Pedagogică, București, 1979.
[33] M. Preda, P. Cristea, Bazele electrotehnicii, vol. I și vol. II – Circuite electrice, Editura Didactică și Pedagogică, București, 1980.
[34] S. Franco, Electric Circuits Fundamentals, Saunders College Publishing, New York, 1995.
[35] R. B. Marks and D. F. Williams, „Comments on conversions between S, Z, Y, H, ABCD, and T parameters which are valid for complex source and load impedances”, IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques, No. 43, 1995.
[36] http://www.keysight.com/en/pc-1297113/advanced-design-system-ads.
[37] ANSOFT Q3D EXTRACTOR, User Guide.
[38] G. Gielen, P. Wambacq, W. M. Sansen, „Symbolic Analysis Methods and Applications for Analog Circuits: A Tutorial Overview”, Proceedings of the IEEE, vol. 82, No. 2, 1994.
[39] P. M. Lin, Symbolic Network Analysis, Elsevier, 1991.
[40] F. Blaabjerg, K. Ma, D. Zhou, „Power Electronics and Reliability in Renewable Energy Systems”, IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 61, nr. 6, 2014.
[41] Polarization of light: https://www.youtube.com/watch?v=8YkfEft4p-w
[42] G. A. Iordăchescu, Microunde: teorie și aplicații, Editura Universității din Pitești, 2018.
[43] AT3000 Kit – manual de utilizare.
[44] VSWR Calculator 3: https://www.everythingrf.com/rf-calculators/vswr-calculator
[45] VSWR Calculator 4: https://www.pasternack.com/t-calculator-vswr.aspx
[46] VSWR Calculator 9: https://www.ahsystems.com/EMC-formulas-equations/VSWR.php
[47] D. M. Pozar, Microwave Engineering, 4th ed., John Wiley & Sons, 2011.
[48] W. Waag, C. Fleischer, D. U. Sauer, „Critical review of the methods for monitoring of lithium-ion batteries in electric and hybrid vehicles”, Journal of Power Sources, vol. 258, pp. 321–339, 2014.
[49] S. Piller, M. Perrin, A. Jossen, „Methods for state-of-charge determination and their applications”, Journal of Power Sources, vol. 96, nr. 1, pp. 113–120, 2001.

[50] X. Hu, S. E. Li, H. Peng, „A comparative study of equivalent circuit models for Li-ion batteries”, Journal of Power Sources, vol. 198, pp. 359–367, 2012.
[51] A. Ali, A. Aftab, M. N. Akram, S. Awan, H. A. Muqeet, Z. A. Arfeen, „Residential Prosumer Energy Management System with Renewable Integration Considering Multi-Energy Storage and Demand Response”, Sustainability, vol. 16, 2156, 2024.
[52] IEC 61851-1:2017, Electric vehicle conductive charging system – Part 1: General requirements, International Electrotechnical Commission.
[53] CHAdeMO Association, CHAdeMO V2G Technical Specifications, [Online]. Disponibil: www.chademo.com.
[54] International Energy Agency (IEA), Global EV Outlook 2024: Trends in Electric Cars and Charging Infrastructure, Paris: IEA Publications, 2024.
[55] Autoritatea Națională de Reglementare în domeniul Energiei (ANRE), Raport privind evoluția pieței prosumatorilor în România 2022–2023, București, 2023.
[56] Asociația Română pentru Energie Sustenabilă, Analiza pieței rezidențiale de fotovoltaice în România: Tendințe și perspective, 2024.
[57] R. Tu, Z. Guo, L. Liu, S. Wang, X. Yang, „Reviews of Photovoltaic and Energy Storage Systems in Buildings for Sustainable Power Generation and Utilization from Perspectives of System Integration and Optimization”, Energies, vol. 18, no. 11, 2683, 2025.
[58] Institutul Național de Cercetare în Energie, Studiu de fezabilitate privind stocarea energiei în sistemele fotovoltaice rezidențiale din România, 2024.
[59] BloombergNEF, Battery Pack Prices Fall to $139/kWh in 2023, Bloomberg New Energy Finance, 2023.
[60] Wallbox, Quasar 2 Bidirectional EV Charger – Technical Specifications, [Online]. Disponibil: https://wallbox.com/en_us/quasar-2-v2h-bidirectional-ev-charger
[61] SolarEdge, SolarEdge Home EV Charger – Technical Overview, [Online]. Disponibil: https://www.solaredge.com
[62] M. Rotaru, G. Rezmeriță, M. Iordache, „Practical Installation of a BMS with V2X Capability”, Analele Universității din Craiova, Seria Inginerie Electrică, vol. 48, nr. 1, 2024.
[63] Panasonic Corporation, NCR18650B Lithium-Ion Battery Datasheet, 2018.
[64] Mean Well Enterprises Co., NTS-450 Series: 450W High Reliable True Sine Wave DC-AC Power Inverter Datasheet, 2022.
[65] MathWorks, Simscape Electrical Reference, The MathWorks, Inc.

LISTA LUCRĂRILOR PUBLICATE

Lucrări publicate în reviste indexate Web of Science (WoS) și conferințe IEEE Xplore, care valorifică integral rezultatele tezei de doctorat:

1. M. Iordache, M. Rotaru, L. Dumitriu, "Automatic Procedure and the Use of the Smith Chart for the Generation of Circuit Matching Parameters", Electronics 2025.
2. M. Iordache, M. Rotaru, ș.a., "Conversions Among Z, Y, H, F, T, and S Parameters for the Two-Port Analogue Networks Stability Analysis", Electronics 2026.
3. M. Rotaru, M. Iordache, "Using the SSEMGP for Transfer Function Generation without Matrix Inversion", SIELMEN 2025.
4. M. Rotaru, "Presentation of the Smith Chart and Applications in Analog Circuits", ATEE 2023.
5. M. Rotaru, "The Use of Smith Diagram for Impedance Matching in Telecommunications", MPS 2023.
6. M. Rotaru, "Design Considerations for Switched-Mode Power Supplies in BMS", ICATE 2024.
7. M. Rotaru, "Generation of Two-Port Circuit and Filter Parameters for EV Architectures", ATEE 2025.