



Universitatea Națională de Știință și Tehnologie
POLITEHNICA București
Școala doctorală de Inginerie Electrică



REZUMAT TEZĂ DE DOCTORAT

SISTEM INTELIGENT DE SORTARE A BATERIILOR LI-ION DIN INDUSTRIA AUTO CARE ȘI-AU ATINS LIMITA DE VIAȚĂ

Coordonator științific:

Prof.Dr.Ing. George-Călin SERIȚAN

Doctorand:

Ing. Iulian-Teodor VOICILĂ

București 2025

Mulțumiri

Profit de această ocazie pentru a exprima prin cuvinte ceea ce poate nu am reușit verbal sau prin faptele mele. Doresc să îi adresez domnului Prof. Dr. Ing. George-Călin Serișan, sincere mulțumiri și aprecieri pentru tot sprijinul și îndrumarea acordată pe parcursul realizării tezei de doctorat. Fără dedicarea și răbdarea dumneavoastră, nu aș fi reușit să duc la bun sfârșit acest proiect ambițios. Ați fost mereu acolo pentru a mă ghida și a mă încuraja, oferindu-mi sfaturi valoroase și susținere. Cunoștințele și expertiza dumneavoastră au fost fundamentale în dezvoltarea mea academică și profesională. Vă sunt profund recunoscător pentru timpul și efortul pe care le-ați investit în formarea mea și în succesul acestei lucrări. Închei aceste rânduri cu speranța că voi putea, la rândul meu, să duc mai departe valorile și cunoștințele dobândite sub atentă dumneavoastră îndrumare.

De asemenea, le mulțumesc colegilor mei, domnul Conf. Dr. Ing. Bogdan-Adrian Enache și doamna Ș. I. Dr. Ing. Irina Vilciu, pentru cunoștințele, înțelepciunea și susținerea morală oferite cu generozitate în ceea ce a însemnat navigarea prin provocările academice și emoționale necesare acestui demers.

Le mulțumesc părinților și prietenilor mei care au fost alături de mine în această călătorie interesantă. Discuțiile și sprijinul reciproc au fost esențiale în parcurgerea acestei aventuri profesionale. Sincere mulțumiri pentru răbdarea și înțelegerea pe care mi-au oferit-o.

Nu în ultimul rând, vreau să îi mulțumesc soției mele, care a reprezentat stâlpul meu de susținere în momentele dificile, de îndoială sau rătăcire, oferindu-mi ajutor în a mă regăsi, rămâne motivat și, cel mai important, a-mi păstra încrederea în mine. Fără dragostea, încurajarea și susținerea ei, mi-ar fi fost greu să răzbat.

Vă sunt profund recunoscător tuturor pentru tot sprijinul acordat!

„Convingerea mea fermă este că există o lege a compensației. Adevăratele recompense sunt întotdeauna proporționale cu munca și cu sacrificiile făcute.” –

Nikola Tesla

CUPRINS

| | | |
|------|---|----|
| I. | INTRODUCERE | 6 |
| I.1 | Formularea problemei | 9 |
| I.2 | Obiectivele cercetării | 11 |
| I.3 | Structura și conținutul tezei | 12 |
| I.4 | Diseminarea rezultatelor | 12 |
| II. | Stadiul actual privind metodele de sortare a bateriilor din industria auto care și-au atins limita de viață | 15 |
| II.1 | Condiții preliminare privind sortarea bateriilor | 16 |
| II.2 | Metode de sortare bazate pe cicluri complete de încărcare-descărcare | 17 |
| II.3 | Metode de sortare bazate pe determinarea parametrilor specifici | 17 |
| II.4 | Metode de sortare hibride | 18 |
| II.5 | Studiu comparativ al metodelor de sortare al bateriilor | 19 |
| III. | Analiza structurilor de conversie de curent continuu utilizate în sisteme de sortare a bateriilor | 23 |
| IV. | Contribuții privind dezvoltarea unei metode de sortare a bateriilor | 24 |
| IV.1 | Prezentarea fluxului tehnologic inovativ pentru sortarea bateriilor | 24 |
| IV.2 | Implementarea etapei de presortare | 25 |
| IV.3 | Prezentarea etapei de grupare | 26 |
| IV.4 | Metoda globală de evaluare | 30 |
| V. | Contribuții privind structura unui sistem de sortare | 31 |
| V.1 | Dimensionarea convertorului de putere Buck-Boost în cascadă | 32 |
| V.2 | Simularea subsistemului electronic pentru convertorul de putere Buck-Boost în cascadă | 35 |
| V.3 | Simularea funcționării sistemului de sortare | 36 |
| V.4 | Proiectarea plăcii de testare pentru circuitul de forță | 39 |
| V.5 | Realizarea sistemului de comandă și control | 40 |

| | | |
|-------------------|--|----|
| VI. | Dezvoltarea codului sursă pentru sortarea bateriilor | 42 |
| VII. | Rezultate și concluzii | 44 |
| VII.1 | Contribuții personale..... | 52 |
| VII.2 | Direcții de dezvoltare ulterioare..... | 53 |
| BIBLIOGRAFIE..... | | 55 |

Cuvinte cheie: sistem de sortare, metodă de sortare, Li-Ion, Buck-Boost în Cascadă; Starea de Sănătate (SOH);

I. INTRODUCERE

În prezent, schimbările climatice reprezintă cea mai importantă preocupare a industriei și mediului academic în vederea dezvoltării durabile. Unul din cele mai provocatoare obiective la nivel global în scopul atenuării schimbărilor climatice este atingerea neutralității emisiilor de carbon, un nivel de emisii de carbon suficient de scăzute cât să poată fi absorbite în siguranță de sistemul natural al planetei [1]. O cauză a creșterii emisiilor de carbon este constituită de industria automobilelor [2]. În 2014, la nivel global, autovehiculele pe bază de benzină și motorină contribuiau cu 14% din emisiile de carbon (Agenția pentru protecția mediului), iar în UE atingeau 25% în 2018, [3]. Astfel, una dintre soluțiile explorate este reprezentată de înlocuirea autovehiculelor actuale, cu cele electrice. Drept urmare, se observă o creștere substanțială a numărului de autovehicule electrice (EV – Electric Vehicle) și autovehicule electrice hibride (HEV – Hibrid Electric Vehicle și PHEV – Plug-in Hibrid Electric Vehicle). Până în 2050, diferite organizații [4], preconizează faptul că vehiculele electrice vor reprezenta aproximativ 60% din piața totală a autoturismelor. Bateriile acestora, din cauza modificărilor fizice și chimice din timpul utilizării lor, ajung să fie retrase din uz într-un interval de timp de mai puțin de 7-12 ani [5], [6], [7], încât în următorii ani, bateriile care echipează această primă generație de vehicule electrice și hibride vor atinge limita de funcționare. În literatura de specialitate, aceasta este denumită sfârșitul vieții (EOL – End Of Life) și este momentul care conduce la inițializarea procesului de înlocuire a lor [8].

În Figura I-1 sunt prezentate etapele ciclului de viață pentru bateriile utilizate în industria auto. După finalizarea procesului de producție, bateriile sunt destinate industriei auto. Ele pot susține energia necesară pentru tracțiunea electrică a autovehiculelor până la atingerea pragului de circa 75%-80% din capacitatea inițială [6]. Soarta bateriilor retrase din uz este reglementată în UE prin Directiva 2000/53/EC – *O revizuire a metodelor de analiză a fluxurilor de materiale dinamice* și Directiva 2006/66/EC – *Baterii și Acumulatori și Deșeuri de Baterii și Acumulatori* care impune ca fabricarea bateriilor și administrațiile locale să fie prevăzute cu un sistem complex capabil să colecteze corespunzător și să recicleze bateriile atunci când nu mai sunt funcționale [7]. În mod tradițional, după ce bateriile au ajuns la sfârșitul vieții din prima fază de utilizare, acestea sfârșesc în unul din cele două cazuri :

1. Demontarea pachetului de baterii și verificarea celor care nu și-au atins limita de viață cu scopul de a le reutiliza prin refabricare în aplicația pentru care au fost proiectate (industria auto);

2. Reciclarea bateriilor pentru extragerea materiilor prime secundare (Li, Ni, CO etc.) cu scopul de a produce noi baterii.

Reciclarea bateriilor este un proces costisitor, cu grad ridicat de poluare, iar costurile crescute de producție sunt considerate unul dintre obstacolele majore care împiedică adoptarea la scară mare a vehiculelor electrice [7]. În acest context, a doua utilizare a bateriilor este una dintre soluțiile explorate pentru reducerea costurilor și a poluării [9]. Conceptul de a oferi o a doua viață (second-life) bateriilor retrase din uz constă pur și simplu în reutilizarea celor care nu mai îndeplinesc cerințele aplicațiilor auto, dar care ar putea fi utilizate în continuare pentru aplicații mai puțin solicitante, cum ar fi surse de alimentare de back-up (UPS), electrocasnice, dispozitive personale, echipamente de tracțiune pentru acționări de puteri mici etc. [3], [10], [11].

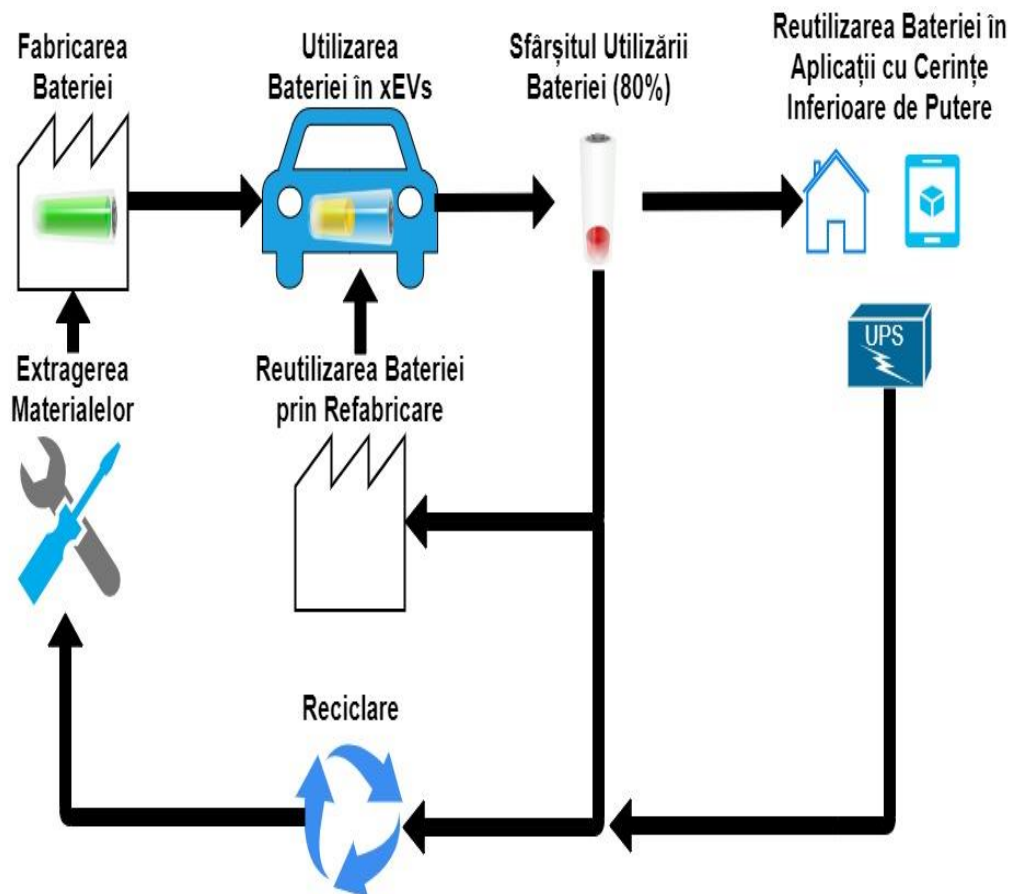


Figura. I-1. Reprezentarea schematică a etapelor ciclului de viață pentru bateriile utilizate în industria auto.

Aceste baterii sunt considerate în faza finală de funcționare, însă ele încă au aproximativ 80% din capacitatea nominală, dar sunt retrase din uz din cauza reglementărilor de siguranță ale industriei auto și a legilor de transport. Acest concept de reutilizare va ajuta la prelungirea duratei de utilizare a bateriilor, la reducerea costurilor pe întreaga perioadă de funcționare și, de asemenea, la popularizarea și generalizarea vehiculelor electrice pe piață [12]. Desigur că, durata de viață a bateriilor destinate către reutilizare depinde în mod clar de cerințele energetice ale aplicației, așa cum este explicat în [13].

Astfel, în continuare este prezentat procesul de reintegrare a bateriilor retrase din industria auto. Spre deosebire de evaluarea necesară înainte de lansarea bateriei pe piață în timpul primei sale utilizări, procesul de testare pentru cea de a doua viață este mai puțin exigent deoarece sunt eliminate testele distructive care au în vedere evaluarea stresului termic, răspunsul la supraîncărcare, răspunsul la supradescărcare etc. [14]. Prin urmare, siguranța bateriilor este deja dovedită până să echipeze vehiculele și astfel doar evaluarea pentru a garanta performanța pentru toata durata din noua viață este necesară. Însă, înainte de evaluarea propriu zisă a bateriilor, acestea trebuie supuse unei faze de pregătire care include istoricul utilizării și motivul pentru care nu se mai poate utiliza în industria auto (atingerea sfârșitului vieții – EOL, daune fizice, motive de siguranță etc.) [15]. După ce aceste informații au fost colectate, atunci se poate decide dacă bateriile sunt supuse mai departe la testele de performanță, altfel sunt eliminate din proces. Dacă totuși primul pas este îndeplinit atunci următoarea fază o reprezintă demontarea modulelor până la nivel de celulă [16], urmând evaluarea performanțelor. În Figura I-2 este prezentat procesul de reintegrare a bateriilor în al doilea ciclu de viață.

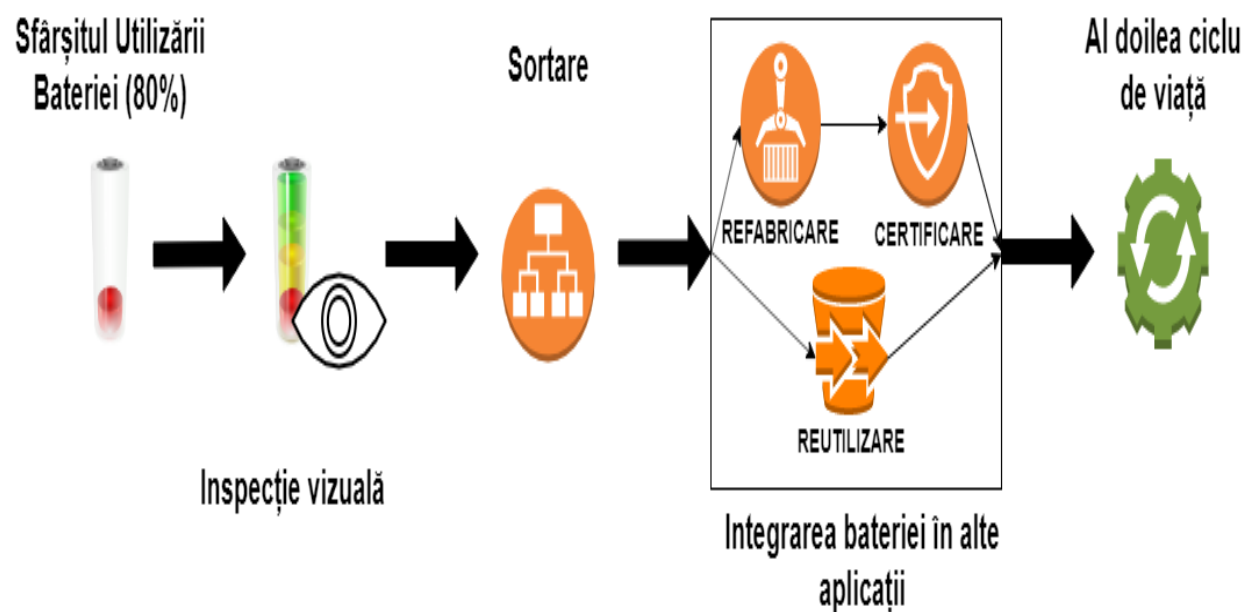


Figura. I-2. Procesul de reintegrare al bateriilor retrase din uz în al doilea ciclu de funcționare.

Acest proces este alcătuit din două etape, în prima etapă toate bateriile sunt examinate vizual cu scopul de a determina orice daune fizice evidente. Inspecția vizuală reprezintă inițierea procesului în care se elimină bateriile cu posibile defecțiuni, precum: coroziuni, umflături, scurgeri de material [17]. Prin urmare, doar bateriile care trec primul test pot fi evaluate în cea de a doua etapă în care vor fi supuse metodelor de sortare. Această etapă evaluează starea de sănătate (SOH) și clasifică bateriile după anumite criterii care depind de chimia bateriei și cerințele aplicației energetice [15].

I.1 Formularea problemei

Creșterea semnificativă a numărului de vehicule electrice și vehicule electrice hibride conduce la retragerea unui număr foarte mare de baterii din industria auto. Astfel, se ridică problema poluării mediului înconjurător și implicit a sănătății oamenilor deoarece bateriile care echipează aceste vehicule își vor atinge limita de funcționare. Reciclarea bateriilor reprezintă o soluție clasică pentru a fabrica noi baterii, conducând la creșterea gradului de circularitate și la limitarea extracției de noi materiale. Pe de altă parte, aceste așa numite baterii ajunse la limita de funcționare au în continuare aproximativ 80% din capacitatea inițială, ceea ce deschide noi oportunități către reutilizarea lor în alte aplicații cu cerințe energetice mai reduse decât cele din industria auto.

Pentru integrarea bateriilor în aplicații auxiliare este nevoie de aplicarea unui proces de sortare în scopul evaluării performanțelor. Acest proces se desfășoară în două etape. Prima etapă se referă la o analiză vizuală cu scopul de a depista daune fizice, iar cea de a doua etapă evaluează starea de sănătate (SOH) și clasifică bateriile rămase pe diferite aplicații energetice. Ideea de bază din spatele conceptului second-life în domeniul bateriilor se referă la o evaluare corespunzătoare a parametrilor, astfel încât pachetele noi de baterii să fie cât mai omogene. Abordările tradiționale de sortare a bateriilor auto necesită un timp îndelungat de testare, sunt costisitoare și se adresează unui singur model de baterii. Mai mult, flexibilitatea redusă a utilizatorului în vederea adaptării referințelor interne a sistemelor de testare reduc semnificativ interesul industriei și al clienților.

Prin prezenta temă de cercetare doctorală se urmărește dezvoltarea unei metode și a unui sistem de sortare automată a bateriilor Li-Ion din industria auto care și-au atins limita de viață în vederea reutilizării lor în alte aplicații cu cerințe energetice inferioare domeniului auto. Metoda propusă de determinare a stării de sănătate a bateriilor este bazată pe o etapă intermediară de presortare în vederea reducerii timpului de testare, urmând ca în etapa de sortare propriu zisă să se utilizeze o metodă cunoscută din literatură ce prezintă acuratețe ridicată. De asemenea, se propune un sistem care folosește un convertor de putere bidirecțional în curent și tensiune ce permite testarea simultană a două sau mai multe celule de tip multi-tehnologie.

Metoda și sistemul automat de sortare vor asigura pentru bateriile reutilizabile soluții ieftine, eficiente și rapide de clasificare în funcție de vârsta lor reală, precum și asigurarea unui dispozitiv scalabil și modular cu scopul testării mai multor celule simultan sau extinderii domeniului pentru testarea modulelor sau a pachetelor de baterii. Funcționarea sistemului automat bazat pe noul algoritm cuprinde următoarele etape:

1. Selectarea tipului de baterie: LFP, LiPo, NMC etc.

2. Selectarea capacității bateriei: 900 mAh, 1100 mAh etc.

3. Măsurarea tensiunii la bornele bateriilor și asimilarea cu valoarea tensiunii de circuit deschis (OCV)

4. Pe baza modelului unei celule LFP dezvoltat în cadrul tezei de doctorat, se stabilește valoarea stării de încărcare (SOC) actuală a bateriei

5. Pentru acest SOC se aplică o secvență de testare conformă cu profilul Hybrid Pulse Power Characterisation Test (HPPC) și se determină valoarea rezistenței interne

6. Folosind algoritmul de sortare dezvoltat, bateriile sunt grupate în funcție de rezistența internă, având în vedere eliminarea erorilor grosolane

7. Se determină vârsta aproximativă a unei singure baterii care caracterizează întreg grupul

I.2 Obiectivele cercetării

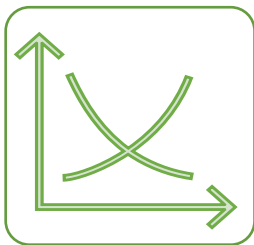
Obiectivul principal al tezei de doctorat este reprezentat de *dezvoltarea unui sistem și a unei metode inovatoare de sortare rapidă și cu precizie ridicată* a bateriilor de Li-Ion din industria auto care și-au atins limita de viață.

Obiectivele secundare ale tezei de doctorat sunt următoarele:



Documentare

- Documentare amănunțită a stadiului actual al metodelor de sortare a bateriilor retrase din uz, urmărind dezvoltarea și realizarea unei metode inovatoare.
- Documentare amănunțită a topologiilor de convertoare statice de putere de tip DC-DC bidirecțional în vederea proiectării și realizării sistemului de testare al bateriilor de tip multi-tehnologie.



Proiectare

- Dimensionarea, modelarea și simularea în softuri specializate a sistemului în vederea studiului comportării circuitelor analogice, digitale și a bateriilor.
- Realizarea codului pentru controlul convertorului de putere în conformitate cu profilurile specifice din manualele PNGV și USABC.
- Realizarea unui model pentru determinarea relației dintre starea de încărcare (SOC) a bateriei și tensiunea de circuit deschis (OCV).
- Realizarea unui model pentru determinarea tensiunii de circuit deschis (OCV) cu acuratețe ridicată.



Validare

- Dezvoltarea prototipului sistemului de sortare a bateriilor.
- Implementarea și verificarea prototipului sistemului de sortare a bateriilor.

În lucrarea de cercetare intitulată „Sistem inteligent de sortare a bateriilor Li-Ion din industria auto care și-au atins limita de viață,” mi-am propus să dezvolt o metodă inovativă pentru sortarea bateriilor retrase din uz prin care timpul global de testare să fie redus semnificativ. În plus, în cadrul lucrării este prezentat și propus un sistem de sortare a bateriilor capabil să testeze simultan 2N baterii de tehnologii identice sau diferite. De asemenea, se va avea în vedere ca sistemul de sortare să poată fi modular și scalabil.

I.3 Structura și conținutul tezei

Lucrarea este structurată pe șapte capitole care cuprind următoarele:

În *Capitolul 1 – Introducere* sunt prezentate aspectele generale privind sortarea bateriilor. De asemenea, este prezentată formularea problemei și modul în care lucrarea de față își propune să o rezolve prin stabilirea unor obiective.

Capitolul 2 – Stadiul actual privind metodele de sortare a bateriilor din industria auto care și-au atins limita de viață este destinat studiului metodelor de sortare a bateriilor din industria auto retrase din uz. Capitolul se încheie cu o analiză comparativă care are la bază patru criterii de comparație cu scopul de a evidenția metodele de sortare cu cele mai optime caracteristici.

În *Capitolul 3 – Analiza structurilor de conversie de curent continuu utilizate în sisteme de sortare a bateriilor* s-a realizat o analiză multi-criterială a convertoarelor de putere DC-DC bidirecționale în vederea alegerii topologiei optime pentru testarea bateriilor de tip multi-tehnologie.

Capitolul 4 – Contribuții privind dezvoltarea metodei de sortare a bateriilor descrie modul de realizare și funcționalitatea metodei propuse pentru sortarea bateriilor, precum și modelarea algoritmului pentru determinarea OCV și SOC.

Capitolul 5 – Contribuții privind structura sistemului de sortare cuprinde atât faza de proiectare și realizare a sistemului, din punct de vedere hardware și software, cât și studiul comportării sistemului prin simularea acestuia în programe specializate (LTspice, Matlab/Simulink).

În *Capitolul 6 – Dezvoltarea codului sursă pentru sortarea bateriilor* sunt evidențiate secvențe de cod utilizate pentru controlul convertorului de putere, pentru realizarea interfeței cu utilizatorul, respectiv implementarea metodei de sortare.

În *Capitolul 7 – Rezultate și concluzii* sunt prezentate concluziile activității științifice desfășurate pe perioada elaborării tezei de doctorat, precum și o trimitere către o serie de direcții de cercetare viitoare.

I.4 Diseminarea rezultatelor

Diseminarea rezultatelor s-a realizat prin publicarea unui număr de cinci articole științifice, din care două ca prim autor și trei în calitate de coautor împreună cu comisia de îndrumare și alți cercetători, precum și realizarea unei cereri de brevet către Oficiul de Stat pentru Invenții și Mărci (OSIM), cu titlul *Metoda și sistem de sortare automată a bateriilor care și-au atins limita de viață în vederea reutilizării lor*. În cadrul activităților de diseminare a rezultatelor proiectului, pe lângă articolele deja publicate, sunt în curs de publicare, în calitate de prim autor, alte două articole științifice. Prima lucrare, **Voicila, T. I., Seritan, G. C., Enache, B. A. (2024), Analysis of bidirectional DC-DC power converters for screening systems of retired batteries**, trimisă către *Revue roumaine des sciences techniques, Serie Electrotechnique et Energetique - IF 0.7 WOS*, abordează studiul structurilor de conversie de curent continuu utilizate în sisteme de sortare a

bateriilor descris în capitolul 2, în care s-a realizat o analiză multi-criterială în vederea alegerii topologiei optime și validarea performanțelor acestora în programul LTspice. A doua lucrare, **Voicila, T. I., Enache, B. A., Argyriou, V., Sarigiannidis, P., Seritan, G. C. (2024), Enhanced OCV estimation in LiFePO₄ batteries: A novel statistical approach leveraging real-time knee/elbow detection**, trimisă către jurnalul *Engineering, Technology & Applied Science Research (ETASR) – IF 1.5 WOS*, tratează dependența dintre starea de încărcare (SOC) și tensiunea de circuit deschis (OCV) a bateriilor în vederea reducerii erorilor de estimare, subiect tratat în capitolul 4.

În prima parte a cercetării am studiat ecuațiile lui Shepherd pentru modelarea bateriilor în Matlab/Simulink deoarece necesită un număr limitat de parametri. Aceștia pot fi obținuți din datele producătorului bateriei sau pe baza unui set experimental de date. Mai mult, aceste ecuații fac deja parte din modelul bateriei regăsit în program și prin urmare algoritmul propus poate fi extins pentru orice tehnologie prin introducerea coordonatelor punctelor marcate din caracteristica nominală de descărcare. Studiul s-a realizat pentru o baterie de Pb-Acid, cu datele extrase din fișa producătorului, în lucrarea: **Gandescu, C. H., Gkanatsios, S., Cepisca, C., Vilciu, I., & Voicila, T. I. (2022). Accurate Modelling of an Online Uninterrupted Power Supply. Journal of Electrical Engineering, Electronics, Control and Computer Science, 8(4), 45-50.** Modelul a fost extins mai departe pentru o baterie de LiFePO₄ și utilizat într-un sistem de sortare a bateriilor retrase din uz în lucrarea: **Voicilă, T. I., Seritan, G. C., Enache, B. A., Stănculescu, M., & Porumb, R. (2023), Design and implementation of a multi-battery, multi-chemistry state of health screening system. In MPS Cluj 21-23.** Sistemul propus prevede un convertor de putere bidirecțional de tip Buck-Boost în cascadă care permite testare simultană a două sau mai multe baterii. În această lucrare s-a determinat rezistența internă a bateriilor în vederea evaluării stării de sănătate. Pe baza rezultatelor obținute în cercetările anterioare, am dorit să continuăm verificarea sistemului de sortare propus. Lucrarea anterior menționată s-a concentrat pe studiul comportării bateriei LFP, modelată cu date experimentale reale, însă funcționarea convertorului de putere nu a fost suficient analizată. Astfel, pentru analiza circuitului electronic s-a implementat sistemul propus în programul de simulare LTspice. În cadrul schemei s-au utilizat macromodelele circuitului de comandă LTC4444, precum și ale comutatoarelor de putere, condensatori, bobină, snubber etc. Cercetarea s-a materializat prin publicarea lucrării: **Voicilă, T. I., Seritan, G. C., Enache, B. A., Porumb, R., & Stănculescu, M. (2023). First Steps Towards the Design of a multi-Chemistry, multi-Battery State of Health Screening System. In 2023 13th International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering (ATEE) (pp. 1-6). IEEE.** În vederea determinării stării de sănătate a bateriilor de Pb-Acid s-a utilizat metoda două pulsuri de descărcare la curent constant pentru care s-au obținut erori mai mici de 5%. Studiul s-a concretizat în lucrarea: **Gkanatsios, S., Vilciu, I., & Voicila, T. I. (2023). Evaluating the state of health of Lead-Acid battery used in UPS. EMERG: Energy. Environment. Efficiency. Resources. Globalization, 9(3).** Un alt subiect de interes l-a reprezentat pierderea capacității atunci când bateriile sunt nefolosite pentru o perioadă îndelungată de timp. Studiul s-a materializat prin publicarea lucrării: **Constantinescu, L. M., Enache, B. A., Dogaru, V. G., Voicila, T. I., Vilciu, I., & Vasile, S. C. (2023). Statistical Analysis of Capacity Loss for Stored**

Batteries. In 2023 15th International Conference on Electronics, Computers and Artificial Intelligence (ECAI) (pp. 01-04). IEEE.

Desprinse din direcția principală de cercetare au fost atinse și alte obiective secundare din care s-au materializat patru lucrări de cercetare ce au vizat îmbunătățirea procesului didactic în lucrarea: Grigorescu, S. D., Seritan, G. C., Enache, B. A., Adochiei, F. C., Argatu, F. C., Vilciu, I., & **Voicila, T. I.** (2022). *A Multipurpose Video Immersion Laboratory. In 2022 E-Health and Bioengineering Conference (EHB) (pp. 1-4). IEEE.*; studiul calității aerului în lucrarea: Vilciu, I., Enache, B. A., Seritan, G. C., & **Voicilă, T. I.** (2023). *An Indoor Air Quality Score Computation and System. In 2023 13th International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering (ATEE) (pp. 1-4). IEEE.*; și integrarea dispozitivelor inteligente în domeniul medical în lucrările: **VOICILA, T. I., BOGDAN, A.-G., ENACHE, B.-A.** (2023). *Guidelines for developing an IOT-enabled application for enhanced hospital management, University of Pitesti Scientific Bulletin Series: Electronics and Computer Science, 23(2), pp. 1-6* și **VOICILA, T. I., BOGDAN, A.-G., ENACHE, B.-A.** (2023). *Comparative analysis of medical equipment identification techniques: A multifaceted approach for enhanced hospital operations, University of Pitesti Scientific Bulletin Series: Electronics and Computer Science, 23(2), pp. 7-12.*

II. Stadiul actual privind metodele de sortare a bateriilor din industria auto care și-au atins limita de viață

Diferite metode de sortare al bateriilor au fost propuse de-a lungul anilor, iar acestea pot fi clasificate în trei categorii: metode de sortare bazate pe cicluri complete de încărcare-descărcare, metode bazate pe parametrii bateriilor (OCV, SOC, Rin etc.) și metode de sortare hibride bazate pe algoritmi inteligenți, analiză statistică și abordări adaptive. În Figura II-1 este prezentată clasificarea metodelor în funcție de principiul folosit. Astfel, pentru metodele bazate pe cicluri complete de încărcare-descărcare vom regăsi profiluri de curent constant (CC), tensiune constantă (CV), respectiv curent constant urmat de tensiune constantă (CCCV). Metodele care utilizează parametrii specifici bateriilor includ: integrarea curentului în timp (Coulomb Counting), măsurarea tensiunii de circuit deschis (OCV), determinarea impedanței, determinarea rezistenței interne, analiza capacității incrementale (ICA), analiza tensiunii diferențiale (DVA) etc. Metodele hibride utilizează în general algoritmi inteligenți (Logică Fuzzy, Rețele Neuronale etc.) în combinație cu alte metode în vederea optimizării procesului.

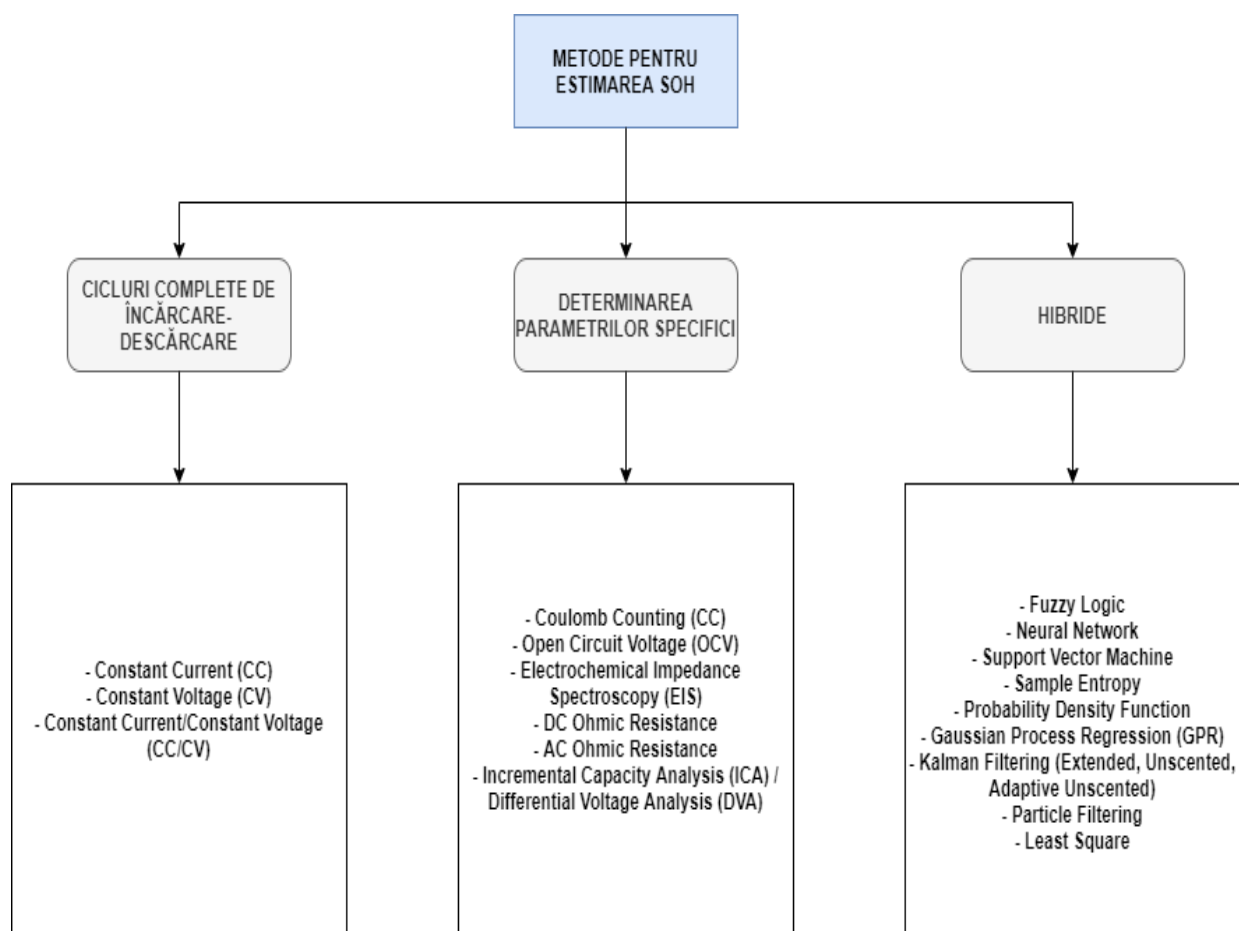


Figura. II-1. Clasificarea metodelor de determinare a stării de sănătate (SOH) [3], [18], [19].

Starea de sănătate a bateriei (SOH) evaluează starea bateriei și nivelul performanței actual în comparație cu cel inițial. Acest parametru nu poate fi calculat direct, precum tensiunea sau curentul, și nu are o definiție clară, făcând dificilă analiza lui. Pentru a estima performanța bateriei, în literatura de specialitate se folosesc parametrii care au legătură cu SOH, precum: capacitatea, impedanța, rezistența internă, starea de încărcare, tensiunea de circuit deschis etc. Pentru a cuantifica acest parametru se definesc următoarele două ecuații [20], [21]:

$$SOH = \frac{C_{actual}}{C_{inițial}} \cdot 100 [\%] \quad (1)$$

$$SOH = \frac{R_{EOL} - R_{actual}}{R_{EOL} - R_{inițial}} \cdot 100 [\%] \quad (2)$$

unde $C_{inițial}$ reprezintă capacitatea bateriei la momentul în care aceasta a ieșit din procesul de fabricare, C_{actual} reprezintă capacitatea bateriei la un moment dat după ce aceasta a fost utilizată, $R_{inițial}$ reprezintă rezistența internă a bateriei la momentul în care aceasta a ieșit din procesul de fabricare, R_{EOL} reprezintă rezistența internă a bateriei la sfârșitul primei utilizări și R_{actual} reprezintă rezistența internă a bateriei la un moment de timp după ce a fost utilizată.

II.1 Condiții preliminare privind sortarea bateriilor

Evaluarea bateriei, indiferent de aplicația unde va fi integrată în a doua sa viață este absolut necesară pentru a-i determina performanțele actuale. Această evaluare este importantă deoarece durata de viață a bateriilor destinate reutilizării nu este cunoscută. Aceasta depinde de modul în care au fost exploatate în primul ciclu de viață, dar și cum vor fi utilizate în viitor [22]. Diferiți factori legați de mecanismul de îmbătrânire fac necesare procesele preliminare de sortare cu scopul de a determina bateriile cu caracteristici adecvate. În caz contrar, bateriile cu consistență slabă pot fi ușor supraîncărcate sau supradescărcate, ceea ce poate duce la încălziri excesive, explozie, scurtcircuite interne etc. [15]. Un astfel de studiu permite caracterizarea corectă a celulelor din punctul de vedere al parametrilor specifici, astfel încât selecția să fie cât mai omogenă [23]. Având în vedere diversitatea modelelor de baterii existente pe piață, este util să se cunoască elementele de bază și criteriile de performanță care le definesc pentru a face comparații semnificative. Orice baterie este caracterizată de o serie de parametri tehnici, o parte a lor fiind oferită în mod obișnuit de producător în cadrul catalogului de specificații, iar restul fiind definiți în urma măsurătorilor efectuate în laborator sau în timpul utilizării. Acești parametri au rolul de a explica modul corect de exploatare al bateriei pentru obținerea unei eficiențe cât mai ridicate.

II.2 Metode de sortare bazate pe cicluri complete de încărcare-descărcare

Metodele de sortare bazate pe cicluri de încărcare-descărcare presupun ca bateria să fie supusă unui ciclu parțial sau complet de încărcare la un curent, respectiv o tensiune maximă specificată de producător. După o perioadă de relaxare, bateria este supusă unui ciclu de descărcare la curentul nominal până când se atinge tensiunea de tăiere (Cut off voltage). Un ciclu parțial se referă la încărcarea bateriei la un *curent constant* (CC), fie la o *tensiune constantă* (CV), iar un ciclu complet reprezintă profilul de încărcare *curent constant – tensiune constantă* (CCCV).

II.3 Metode de sortare bazate pe determinarea parametrilor specifici

Metoda *Coulomb Counting* este una din cele mai răspândite metode pentru determinarea stării de sănătate a bateriilor, indiferent de chimia acestora [24]. Metoda presupune măsurarea capacității efective folosind procesul de încărcare-descărcare și determinarea SOH cu ajutorul ecuației (1). Această metodă implică două etape: în prima etapă se determină capacitatea efectivă a bateriei la descărcare, corelată cu starea de încărcare de 0% prin integrarea curentului în timp, iar în cea de a doua etapă se calculează SOH. Metoda *OCV* pentru determinarea stării de sănătate a bateriei presupune definirea dependenței SOH de tensiunea de circuit deschis. Așa cum este prezentat în [24], pe baza monitorizării tensiunii de circuit deschis se construiește caracteristica SOC-OCV care poate fi utilizată pentru toate tipurile de baterii cu mențiunea că aceasta diferă pentru fiecare în parte. Metoda de determinare a *rezistenței interne în curent continuu (DC)* sau *alternativ (AC)* se poate realiza în două moduri. Prima metodă se referă la studiul comportării bateriei în curent continuu, iar asta presupune descărcarea sau încărcarea bateriei și măsurarea rezistenței cu ajutorul legii lui Ohm, adică raportul dintre diferența tensiunii înainte și după descărcare, și curentul de descărcare. Metoda de determinare a rezistenței interne în AC presupune injectarea unui semnal alternativ cu o frecvență de 1 kHz sau mai mare, cu scopul excitării bateriei. Apoi se aplică legea lui Ohm și se calculează rezistența [25]. Astfel, impedanța electrică este raportul dintre variația tensiunii și cea a curentului, și descrie atât amplitudinea relativă a celor doi parametrii cât și faza relativă. La fel ca la metoda de determinare a rezistenței interne în AC, metoda *EIS* (Electrochemical Impedance Spectroscopy) utilizează un semnal alternativ de amplitudine mică cu frecvențe cuprinse între 0.025 Hz și 4 kHz [3]. După aplicarea semnalului, impedanța internă a bateriei se determină prin trasarea dependenței între partea imaginară și cea reală cu ajutorul diagramei Nyquist. O altă metodă care se poate aplica pe scară largă pentru caracterizarea bateriei prin identificarea mecanismului de îmbătrânire este *analiza ICA/DVA* (Incremental Capacity Analysis / Differential Voltage Analysis) și este definită conform [26] după cum urmează. IC se determină pe baza diferenței de capacitate ca urmare a modificării tensiunii la bornele bateriei, în timp ce analiza DV este definită ca inversul IC. Vârfurile de pe curba de încărcare/descărcare a tensiunii reprezintă tranzițiile de fază între electrozi, iar vârfurile de pe curba de încărcare/descărcare a capacității indică punctele de fază aflate în echilibru.

II.4 Metode de sortare hibride

Metodele hibride sunt obținute prin utilizarea algoritmilor inteligenți (NN – Neural Networks, FL – Fuzzy Logic, KF – Kalman Filter, SVM – Support Vector Machine, RVM – Relevance Vector Machine etc.) împreună cu una sau mai multe tehnici menționate anterior, astfel încât procesul de sortare să fie rapid și precis [27]. Metoda *Fuzzy Logic* are la bază logica booleană și categorii sau seturi predefinite de condiții. O funcție fuzzy este aplicată unei intrări x care face parte dintr-un set fuzzy A , iar ieșirea este un număr cuprins între 0 și 1 care reprezintă gradul de apartenență al intrării x față de setul A . În logica fuzzy se utilizează operatorii logici ȘI, SAU și NEGARE [24]. În cazul determinării stării de sănătate a bateriei se poate defini ieșirea ca un set de răspunsuri predefinite, spre exemplu: stare inacceptabilă, stare acceptabilă, stare excelentă. Metoda *Neural Networks* este un model matematic care încearcă să imite funcționarea creierului uman cu ajutorul unor neuroni artificiali distribuiți pe trei niveluri: neuroni de intrare, neuroni de ieșire și neuroni care creează legături între intrări și ieșiri. În primul nivel se regăsesc datele de intrare achiziționate care servesc la realizarea celui de al doilea nivel. În această etapă fiecare neuron are implementată o funcție matematică care determină un rezultat ponderat în funcție de intrări. Cu cât este mai mare ponderea cu atât se obține o sensibilitate mai bună [26]. Ultimul nivel prezice valorile de ieșire și devine din ce în ce mai performant pe măsură ce algoritmul este instruit pentru mai mult timp sau se crește complexitatea prin numărul de neuroni intermediari. Metoda *SVM* (Support Vector Machine) reprezintă un algoritm care analizează datele de intrare și construiește un model de legătură între mărimile de intrare și cele de ieșire. Gradul de dificultate al modelului crește proporțional cu volumul informației utilizat pentru instruirea algoritmului [26]. *SampEn* (Sample Entropy) este o metodă statistică care analizează răspunsul variației tensiunii la bornele bateriei în procesul de îmbătrânire, putând astfel monitoriza capacitatea bateriei [3]. Metodele probabilistice sunt din ce în ce mai folosite în sistemele de determinare a stării de sănătate a bateriilor. Una din cele mai cunoscute este *Probability Density Function* (PDF) care este definită ca o funcție de variabile aleatorii continue și încadrate într-un anumit interval. O altă metodă de estimare a SOH din ce în ce mai răspândită în rândul metodelor probabilistice este metoda *Gaussian Process Regression* (GPR). Procesul gaussian este definit ca un set de variabile aleatorii care caracterizează distribuția probabilității pentru fiecare submulțime finită de variabile, descrisă de media valorilor (μ) și covarianță (Σ). O metodă foarte folosită în literatura de specialitate este *Kalman Filtering* (KF). Kalman Filtering este o metodă adaptivă care analizează dinamica seriei de măsurători și estimează pe baza lor variabilele de ieșire [28]. Această metodă presupune un proces realizat în două etape. În prima etapă se realizează o predicție a stărilor sistemului pentru care se determină variabilele de ieșire. Apoi, în a doua etapă, variabilele estimate sunt actualizate astfel încât să se atingă o acuratețe cât mai ridicată [29]. O alternativă la metoda KF este metoda *Particle Filter* (PF) unde singura diferență dintre cele două metode este dată de faptul că PF nu presupune o medie zero a stărilor și zgomotelor modelului pentru distribuția Gauss [30]. Răspunsul de ieșire al metodei este o estimare a probabilității densității funcției având la bază

un set de puncte ponderate (particule), care sunt valori eșantionate din spațiul stărilor cu cea mai mare probabilitate relativă.

Din analiza și descrierea metodelor realizate anterior se observă că abordările metodelor se încadrează într-una din cele două categorii:

- fie sunt metode rapide cu o precizie relativ scăzută și complexitate scăzută/medie;
- fie sunt metode care necesită date istorice din perioada de funcționare a bateriei pentru a îmbunătăți rezultatele și astfel presupun un timp mai îndelungat de testare și o complexitate crescută, dar au o precizie foarte ridicată.

II.5 Studiu comparativ al metodelor de sortare al bateriilor

Având în vedere analiza realizată anterior, s-a procedat la un studiu comparativ al metodelor de sortare care după cum a fost prezentat se clasifică în trei categorii, și anume: metode care folosesc cicluri complete de încărcare-descărcare (CC, CV, CCCV), metode care determină parametri specifici (C, OCV, Rin) și metode hibride (FL, NN, PF) care utilizează algoritmi inteligenți și fuzionează cu alte metode pentru creșterea performanțelor. Pentru fiecare metodă din cadrul unui grup s-a realizat o caracterizare în funcție de complexitate, eroare de determinare a stării de sănătate, avantaje și dezavantaje. Din punctul de vedere al complexității, metodele sunt caracterizate pe trei niveluri, complexitate scăzută, medie și ridicată. Eroarea este exprimată în procente, iar avantajele și dezavantajele au în vedere evidențierea efortului de calcul, aplicarea pe scară largă a metodei și posibilitatea îmbunătățirii metodei. În Tabelul II-1, este prezentat studiul comparativ realizat pentru metodele de sortare al bateriilor în vederea determinării stării de sănătate.

Tabel II-1. Studiu comparativ al metodelor de sortare al bateriilor pentru determinarea stării de sănătate

| Metode | | Criterii | | | |
|---|------|--------------|--------|---|---|
| | | Complexitate | Eroare | Avantaje | Dezavantaje |
| Cicluri complete de încărcare-descărcare [31], [32], [33], [34], [35], [36] | CC | Medie | 2-5% | -Efort de calcul scăzut -Precisă -Fiabilă | -Nu se poate aplica pe scară largă -Timp de funcționare îndelungat -Presupune prelucrarea datelor |
| | CV | Medie | <5% | | |
| | CCCV | Medie | <3% | | |

| | | | | | |
|---|---|---------|-------|---|---|
| | | | | | pentru îmbunătățirea performanțelor |
| Determinarea parametrilor specifici [3], [23], [24], [33], [37], [38], [39] | Coulomb Counting | Scăzută | 1-10% | -Efort de calcul scăzut -Consum redus de putere -Ușor implementat | -Creștere performanței presupune utilizarea unei metode hibride -Necesită recalibrare asupra mediului în care se desfășoară testul |
| | Open Circuit Voltage | Scăzută | 1-20% | -Rapidă -Se poate implementa ușor cu alte metode | -Nu se poate aplica pe scară largă -Necesită timp pentru corelarea OCV-SOH |
| | Electrochemical Impedance Spectroscopy | Scăzută | 2-15% | -Evită calcule complicate dacă nu se utilizează în combinație cu alte metode -Fiabilitate ridicată | -Este utilizată în special pentru bateriile din familia Li-Ion -Necesită echipament dedicat |
| | DC Ohmic Resistance | Scăzută | <4% | -Rapidă -Precisă -Necesită putere de calcul redusă | -Este sensibilă la mulți factori -Nu poate fi aplicată des |
| | AC Ohmic Resistance | Medie | <4% | -Rapidă -Detectează rapid existența unui defect | -Rezultatele obținute pot diferi în funcție de frecvența utilizată -Este sensibilă la mulți factori |
| | Incremental Capacitance | Medie | 1-3% | -Se poate aplica pe scară largă | -Sensibilă la zgomot și la modificarea performanței bateriei |

| | | | | | |
|--|---|--------|---------|--|---|
| | y Analysis / Differential Voltage Analysis | | | -Se poate aplica pe orice tip de baterie din familia Li | -Necesită aplicarea unor algoritmi de filtrare |
| Hibride [5], [29], [31], [36], [40], [41], [42], [43], [44], [45], [46], [47], [48], [49], [50] | Fuzzy Logic | Ridică | 1.4-10% | -Se poate utiliza pentru orice tip de baterie -Adaptabilitate ridicată | -Performanța depinde de procesul de instruire -Efort de calcul foarte ridicat |
| | Neural Network | Ridică | 0.28-8% | -Se poate utiliza pentru orice tip de baterie -Utilizează parametrii ușor de măsurat | -Are nevoie de foarte multe date pentru instruire -Necesită echipamente performante |
| | Support Vector Machine (SVM) | Ridică | <2% | -Precizie ridicată -Timp de predicție scăzut | -Este foarte complexă -Acuratețea depinde de calitatea măsurătorilor |
| | Sample Entropy | Ridică | 1.2%-2% | -Se poate utiliza pentru orice familie de baterii -Se poate aplica atât offline cât și online | -Necesită combinarea cu alte metode inteligente -Complexitatea ridicată |
| | Probability Density Function | Medie | 2% | -Acuratețe mult mai bună decât metodele de curve fitting -Relativ ușor de implementat | -Toate studiile aplică metoda pe bateriile de Li-Ion -Necesită teste pe baterie în prealabil |

| | | | | | |
|--|------------------------------------|--------|-----------|---|--|
| | Gaussian Process Regression | Medie | 0.5%-3.5% | -Cost redus de implementare -Versatilitate ridicată | -Necesită prelucrări de date în prealabil -Sensibil la funcția de covarianță aleasă |
| | Kalman Filtering | Medie | 0.5-8.3% | -Se poate aplica pentru orice tip de baterie -Acuratețe ridicată | -Necesită stocarea multor date -Necesită prelucrarea datelor |
| | Particle Filtering | Ridică | 0.4-12% | -Se poate utiliza pentru orice familie de baterii -Precizie ridicată | -Necesită multe date pentru instruirea modelului -Necesită măsurări de precizie |

Pe baza studiului comparativ al metodelor de sortare pentru bateriile din industria auto, prezentat în Tabelul II-1, se observă faptul că fiecare metodă prezintă caracteristici interesante, atunci când punctele avantajoase sunt reprezentate de precizie și viteză de calcul. Însă, întotdeauna există un compromis, fie metoda este dificil de implementat, fie efortul de calcul este prea mare.

Având în vedere numărul tot mai mare de baterii retrase din uz care vor apărea în viitorul apropiat, consider că optica metodelor de sortare trebuie să se schimbe, iar accentul se va pune pe dezvoltarea unor metode foarte rapide. În ceea ce privește acuratețea metodelor, aceasta ar trebui să fie sub 3%. Această valoare reprezintă inconsecvența inițială a capacității bateriei de la orice baterie cu BMS (Battery Management System). Cu toate că retragerea din uz a primei generații de baterii care echipează vehicule electrice și vehicule electrice hibride din cauza limitei de funcționare se va întâmpla în curând, trebuie să avem în vedere sfârșitul vieții următoarei generații deoarece majoritatea bateriilor au o durată de viață de 8-12 ani, iar nevoia de energie este în continuă creștere.

III. Analiza structurilor de conversie de curent continuu utilizate în sisteme de sortare a bateriilor

Un element important al sistemului de testare este reprezentat de structura de conversie DC-DC utilizată. Aceasta este responsabilă de eficiența energetică a conversiei și de flexibilitatea sistemului prin posibilitatea schimbării polarității curentului și tensiunii. Având în vedere că această lucrare își propune transferul de putere între două baterii de tip multi-tehnologie, una din baterii va fi descărcată, în timp ce cealaltă baterie va fi încărcată, atunci se va lua în considerare proiectarea și realizarea unui convertor static de curent continuu bidirecțional. În cele ce urmează se prezintă un studiu comparativ între topologiile convertoarelor DC-DC bidirecționale. Cu scopul de a determina topologia optimă, s-au definit cele mai importante caracteristici ale convertoarelor de acest tip, iar apoi s-a aplicat o analiză multicriterială. Din rezultatele obținute se va alege topologia cu cel mai ridicat scor pentru care se va continua procedura în vederea dimensionării și realizării practice a structurii de conversie alese.

Având în vedere numărul mare de criterii și varietatea opțiunilor pentru fiecare criteriu considerat în analiza comparativă se va utiliza o analiză multicriterială (MCA). Această tehnică permite structurarea și combinarea mai multor criterii în mod simultan, cu scopul de a lua o decizie pentru o situație complexă. Așadar pentru fiecare criteriu în parte se va atribui un scor cuprins între 0 și 100, unde 100 înseamnă cel mai favorabil caz. După construirea matricei cu alocarea scorurilor, se va realiza matricea de performanță în care fiecare criteriu primește o pondere exprimată ca procent, astfel încât suma lor să fie egală cu 100%. Ponderile sunt distribuite și descrise după cum urmează: tipul de funcționare primește o pondere de 15%, numărul de bobine și/sau transformatoare 10%, numărul de condensatoare 10%, numărul de comutatoare 5%, numărul de diode 5%, densitatea de putere 15%, complexitate 10%, dimensiuni 10%, cost 5% și eficiență 15%. Prin însumarea ponderilor se obține un maxim de 100%. Această schemă de ponderare se aliniază cu metodologia stabilită în [51].

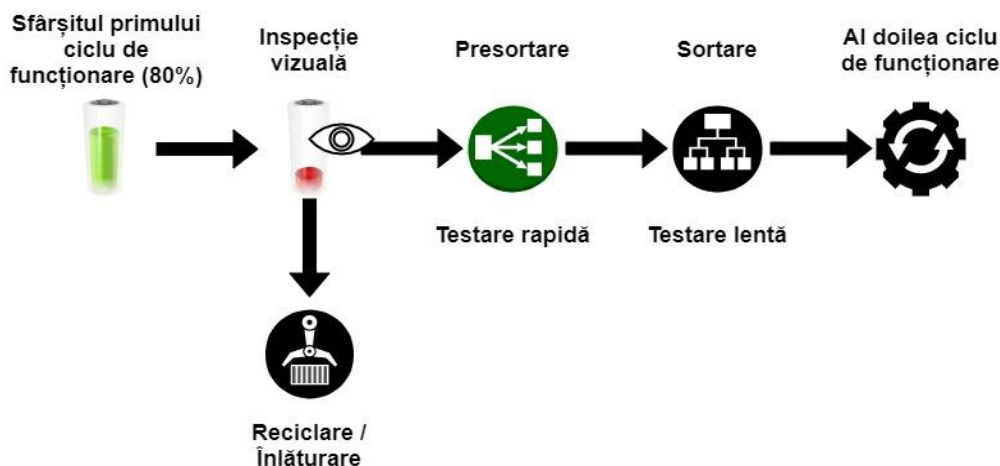
În urma analizei multi-criteriale, s-a determinat faptul că topologia Buck-Boost în cascadă reprezintă cea mai bună soluție dintre topologiile studiate și se va utiliza în continuare în vederea dimensionării, simulării circuitului și proiectării soluției propuse.

IV. Contribuții privind dezvoltarea unei metode de sortare a bateriilor

Odată ce bateriile și-au atins limita de funcționare, adică atunci când capacitatea efectivă este 80% din capacitatea nominală, acestea sunt retrase din uz. Conform noțiunilor prezentate anterior în legătură cu reutilizarea bateriilor s-a discutat faptul că acestea trebuie testate înainte de a fi instalate în alte aplicații. În acest scop, primul pas este realizarea unei inspecții vizuale, iar apoi testarea propriu-zisă. Bateriile care nu se încadrează în normele tehnice de testare sunt trimise direct către reciclare sau sunt înlăturate complet. Pentru a reduce timpul global de testare această teză propune o nouă metodă de evaluare a bateriilor. Astfel, înainte de sortarea bateriilor cu ajutorul uneia dintre metodele amintite mai devreme, se realizează o etapă intermediară de presortare prin care bateriile sunt grupate în funcție de rezistența internă, urmând ca o singură baterie să fie evaluată complet.

IV.1 Prezentarea fluxului tehnologic inovativ pentru sortarea bateriilor

În Figura IV-1a sunt prezentate fazele de reintegrare a bateriilor retrase din uz în alte aplicații cu cerințe energetice mai reduse decât cele din industria auto.



a)

Presortare



b)

Figura. IV-1. Etapele metodei de sortare a bateriilor retrase din uz.

În această etapă de presortare se aplică un impuls de curent constant de încărcare pentru bateria cu starea de încărcare (SOC) cea mai mică, respectiv de descărcare pentru bateria cu starea de încărcare (SOC) mai mare. Durata impulsului, precum și amplitudinea semnalului este stabilită conform manualului USABC [52]. Astfel, înainte de aplicarea impulsului de curent se măsoară tensiunea de la bornele bateriilor pentru determinarea tensiunii de circuit deschis (OCV), iar după terminarea descărcării/încărcării parțiale se măsoară din nou tensiunea de la bornele bateriilor. Pe baza acestor tensiuni, și cunoscând valoarea curentului impus, se poate determina rezistența internă a bateriilor utilizând legea lui Ohm. Prin urmare, rezistența internă a bateriilor va fi egală cu raportul dintre diferența tensiunii după aplicarea impulsului și tensiunea de circuit deschis, și valoarea impulsului de curent.

Figura IV-1b prezintă o descriere extinsă a etapei de presortare. Inițial, se determină rezistența internă a bateriei conform procedurii descrise anterior. Apoi, fiecare baterie primește un identicator care ține cont de chimia bateriei, caracteristicile sale tehnice și numărul de ordine. După terminarea testării tuturor bateriilor, acestea sunt grupate în funcție de rezistența internă, iar din fiecare grup se elimină bateriile care se abat cu mai mult de o abatere standard. În final se reia procedura standard de sortare prin utilizarea unei metode lente de determinare a stării de sănătate a bateriilor. De remarcat faptul că o singură baterie dintr-un grup este testată în amănunt, iar aceasta va caracteriza întreg grupul.

IV.2 Implementarea etapei de presortare

Caracterizarea bateriilor retrase din uz este esențială pentru realizarea unui nou pachet de baterii cu caracteristici cât mai similare și pentru asigurarea unei funcționări adecvate, indiferent de aplicația în care va fi integrată. Totuși, aceste sisteme electrochimice prezintă un grad ridicat de complexitate și sunt definite de un comportament neliniar, ceea ce face provocatoare caracterizarea lor, parametrii principali care le caracterizează fiind rezistența internă și capacitatea bateriei [53], [54]. Acuratețea, timpul de testare și infrastructura necesară reprezintă o barieră majoră în reducerea costurilor și optimizarea tehnicilor de evaluare a stării de sănătate a bateriilor. Evaluarea corespunzătoare reprezintă un criteriu major pentru maximizarea duratei de viață, reducerea problemelor de siguranță și asigurarea viabilității economice și tehnice [55], [56], [57].

În ceea ce privește valoarea impedanței sau a rezistenței interne, este dificil să se atribuie o valoare unică, din cauza naturii sale dinamice, susceptibilă atât la factori interni (stratul solid de interfață al electrolitului, rezistența internă a cablajului, colectorul de curent, fenomenul de histerezis), cât și externi (temperatură, stare de încărcare, istoricul utilizării, sarcină) [56], [58]. Prin urmare, determinarea rezistenței interne este fezabilă numai dacă este însoțită de descrierea detaliată a condițiilor în care a fost efectuată măsurătoarea [59].

Metoda DC pulse, presupune aplicarea unui impuls de curent și măsurarea răspunsului tensiunii la borne după o durată de timp bine definită, așa cum este prezentat în Figura IV-2. Astfel,

se măsoară tensiunea de circuit deschis (U_{OC}), înainte de aplicarea pulsului, și după aplicare (U). Utilizând legea lui Ohm se determină rezistența internă. De remarcat faptul că valoarea rezistenței interne depinde de amplitudinea pulsului de curent, de durata acestuia și de profilul impulsului, încărcare sau descărcare [60].

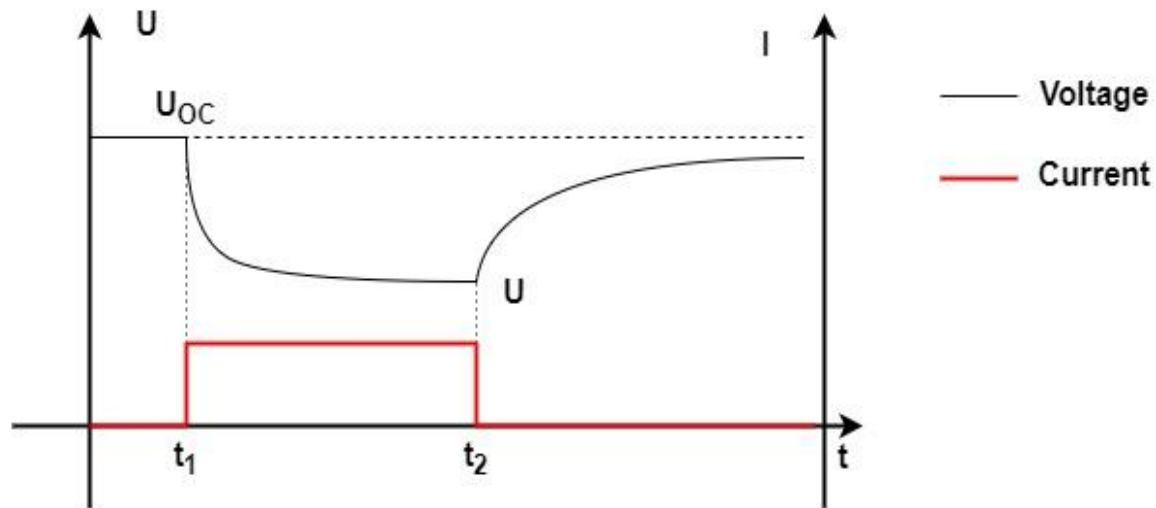


Figura. IV-2. Răspunsul tensiunii la bornele bateriei la aplicarea unui impuls de curent de încărcare.

Rezistența internă este invers proporțională cu impulsul de curent aplicat și este afectată de fenomenul de histererezis. Tensiunea măsurată la bornele bateriei va crește mai rapid pentru o sarcină mai mare datorită accelerării procesului chimic. Drept urmare starea de încărcare a bateriei se poate modifica suficient de mult cât să determine o analiză greșită a stării de încărcare actuale în comparație cu cea reală [61]. De asemenea, o durată prea scurtă de timp nu va fi suficientă pentru a surprinde toate elementele rezistive [62]. Conform diferitelor standarde (ISO, EUCAR, USABC) și studii asupra duratei impulsului de curent, aceasta este, în general, mai scurtă de 20 secunde [61].

IV.3 Prezentarea etapei de grupare

Metoda pleacă de la premisa conform căreia bateriile testate nu au fost utilizate pentru o perioadă de timp mai mare de o oră, astfel încât tensiunea de ieșire de la bornele bateriei poate fi asimilată ca tensiune de circuit deschis (OCV). Astfel, pentru determinarea SOC se utilizează un model polinomial de ordin superior care aproximează această valoare în funcție de tensiunea de circuit deschis (OCV). În această lucrare se propune o nouă metodă pentru determinarea OCV în care nu se mai utilizează o perioadă fixă de repaus de 1 oră, criteriul de oprire fiind considerat de variația tensiunii de stabilizare atunci când aceasta se încadrează în intervalul de $\pm 1\text{mV/oră}$ sau atunci când se atinge durată maximă de 24 de ore. Utilizarea acestui criteriu asigură stabilizarea

proceselor electrochimice mai profunde, asigurând măsurarea reală a OCV. Un criteriu de oprire similar este folosit în alte lucrări pentru a evalua relația SOC – OCV cu erori care depășesc 7% pentru estimarea OCV [63], [64], [65]. De remarcat, propunerea unei metode hibride în lucrarea [66], care implică o perioadă inițială de testare de 24 de ore, urmată de un test secundar de 5.2 ore și o tranziție de la o scală de timp normală la una logaritmică. Această metodă realizează o eroare de estimare a OCV mai mică de 1%. Pornind de la această metodă a fost dezvoltată o nouă tehnică de evaluare a relației SOC – OCV. Astfel, în loc să se utilizeze două puncte distincte din curba de repaus – unul la 1 oră și altul la sfârșitul perioadei de relaxare de 24 de ore – a fost introdus un nou punct corespunzător punctului de inflexiune (knee/elbow) al curbei. Acest punct semnifică tranziția de la o regiune în care tensiunea variază semnificativ la una în care devine mai stabilă și mai liniară, surprinzând astfel interacțiunea complexă a diferitelor procese electrochimice.

În vederea elaborării algoritmului s-a utilizat o baterie LFP APR nouă de 1.1 Ah pentru a determina modelul statistic pentru estimarea OCV. Această baterie a fost supusă procedurii de testare USABC pentru determinarea capacității efective prin utilizarea unei secvențe de descărcare constantă folosind trei curenți diferiți: C1/1, C2/2 și C3/3.

Aceste date au servit drept parametri de intrare pentru modelul de regresie multivariabilă dezvoltat. Modelul a fost împărțit în două submodele separate pentru a reduce erorile de estimare datorate fenomenului de histerezis: unul pentru estimarea OCV după o încărcare și unul pentru estimarea OCV după o descărcare. Odată ce ipotezele au fost verificate, coeficienții de regresie multipli pentru fiecare model au fost calculați și prezentați în ecuațiile (3) și (4).

$$OCV_{\text{încărcare}} = -0.135 \cdot U_{\text{inițial}} + 1.215 \cdot U_{\text{cot}} - 0.272 \quad (3)$$

$$OCV_{\text{descărcare}} = -0.112 \cdot U_{\text{inițial}} + 1.063 \cdot U_{\text{genunchi}} + 0.162 \quad (4)$$

O evaluare preliminară a modelului propus a fost efectuată folosind metode statistice. Astfel, au fost calculate valorile R și R^2 , rezultând valori de 0.99 pentru R , respectiv 0.99 pentru R^2 . Aceste rezultate indică faptul că modelul prezintă o precizie mare de predicție de 99% și că 99% din variația variabilei dependente este explicată de variabilele independente. În continuare, pentru a evalua acuratețea modelului dezvoltat, va fi efectuată o procedură de testare a bateriei pentru diferite valori ale SOC, precum și pentru un nou set de date achiziționat de la o altă baterie LFP de 1.5 Ah de la un alt producător. Nivelurile SOC de 50% și 60% au fost alese în mod specific datorită efectului de platou caracteristic bateriilor LFP, care prezintă o provocare unică pentru estimarea precisă a OCV în această zonă. Acest efect duce adesea la o variație redusă a tensiunii odată cu modificarea SOC, oferind o condiție ideală pentru a testa robustețea modelului. Prin urmare, vor fi examinate patru seturi de date, și anume: bateria APR cu SOC 60%, care a fost folosită pentru antrenarea modelului, bateria APR cu SOC 50% pentru verificarea modelului atunci

când sunt cunoscute caracteristicile bateriei și bateria BSE cu SOC 60% și 50% pentru care nu sunt cunoscute caracteristicile proprii.

Prin monitorizarea bateriilor timp de 24 de ore și utilizând condiția de oprire, a fost obținut adevăratul OCV. Mai departe, aceste valori au fost comparate cu valorile OCV calculate. Rezultatele obținute sunt prezentate în Tabelul IV-2 și IV-3.

Tabel IV-1. Rezultatele obținute pentru OCV calculat după descărcare.

| Descărcare | APR 60% | APR 50% | BSE 60% | BSE 50% |
|-----------------|----------|----------|----------|----------|
| $U_{inițial}$ | 3.266 V | 3.261 V | 3.244 V | 3.244 V |
| $U_{genunchi}$ | 3.285 V | 3.282 V | 3.284 V | 3.285 V |
| OCV calculat | 3.2555 V | 3.2529 V | 3.2571 V | 3.2581 V |
| OCV adevărat | 3.294 V | 3.292 V | 3.296 V | 3.294 V |
| Eroare relativă | 1.168% | 1.187% | 1.179% | 1.087% |

Tabel IV-2. Rezultatele obținute pentru OCV calculat după încărcare.

| Încărcare | APR 60% | APR 50% | BSE 60% | BSE 50% |
|-----------------|----------|----------|----------|----------|
| $U_{inițial}$ | 3.357 V | 3.348 V | 3.409 V | 3.397 V |
| U_{cot} | 3.313 V | 3.308 V | 3.317 V | 3.312 V |
| OCV calculat | 3.3001 V | 3.2952 V | 3.2979 V | 3.2934 V |
| OCV adevărat | 3.301 V | 3.299 V | 3.304 V | 3.302 V |
| Eroare relativă | 0.027% | 0.113% | 0.183% | 0.257% |

Rezultatele obținute demonstrează că modelul calculează cu succes OCV, având o eroare relativă mai mică de 0.26% atunci când bateriile au fost supuse procesului de încărcare, respectiv o eroare sub 1.2% după descărcare.

Aproximarea stării de încărcare, din 10 în 10 procente, s-a obținut pe baza unui set de date realizat experimental prin aplicarea unui ciclu complet de încărcare-descărcare și utilizarea algoritmului menționat anterior pentru două baterii LFP cu capacități diferite: 1100 mAh (APR) și 1500 mAh (BSE), așa cum se poate vedea în Tabelul IV-4 și IV-5.

Tabel IV-3. Date experimentale baterie LFP APR 1100mAh.

| | | | | | | | | | | |
|-----|-------|--------|--------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| SOC | 100% | 90% | 80% | 70% | 60% | 50% | 40% | 30% | 20% | 10% |
| OCV | 3.455 | 3.3345 | 3.3249 | 3.302 | 3.2905 | 3.2849 | 3.2684 | 3.2425 | 3.2039 | 3.0987 |

Tabel IV-4. Date experimentale baterie LFP BSE 1500mAh.

| | | | | | | | | | | |
|-----|-------|--------|--------|--------|--------|-------|-------|--------|--------|-------|
| SOC | 100% | 90% | 80% | 70% | 60% | 50% | 40% | 30% | 20% | 10% |
| OCV | 3.385 | 3.3347 | 3.3178 | 3.3007 | 3.2879 | 3.281 | 3.274 | 3.2591 | 3.2312 | 3.181 |

Zona de interes pentru care polinomul caracteristic ar trebui să aibă cea mai mică eroare este în intervalul 40% - 80% SOC datorită zonei de platou caracteristice bateriilor LFP, dar și în intervalul 80% SOC – 100% SOC datorită modului în care acestea vor fi depozitate. După cum se poate observa polinomul de ordinul 5 are erorile cele mai reduse pe tot intervalul de valori. Desigur, un polinom de ordin superior ar avea erori și mai mici, însă apar probleme de calcul și supra-adaptare a caracteristicii. De asemenea, prin creșterea ordinului polinomului caracteristic se mărește și precizia de calcul necesară pentru determinarea stării de încărcare. Astfel, făcând un compromis între complexitate și valorile erorilor, caracterizarea celor două baterii se va realiza cu ajutorul unui polinom de ordinul 4 prezentat în ecuația (5) și (6):

$$SOC_{APR} = 100 \cdot (-811.7697719713 \cdot OCV^4 + 10522.49141675 \cdot OCV^3 - 51114.3955091 \cdot OCV^2 + 110282.823738 \cdot OCV^1 - 89174.20659453) \quad (5)$$

$$SOC_{BSE} = 100 \cdot (-1009.059039778 \cdot OCV^4 + 12882.06204957 \cdot OCV^3 - 61607.4321747 \cdot OCV^2 + 130810.64900675 \cdot OCV^1 - 104045.77925049) \quad (6)$$

După ce toate bateriile au fost testate, se formează grupuri de baterii din 10 mΩ în 10 mΩ începând de la bateria cu rezistența cea mai mică. Mai departe, pentru fiecare grup format se calculează valoarea medie și abaterea standard, conform ecuațiilor (7) și (8).

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} \quad (7)$$

unde \bar{x} este valoarea medie a setului de măsurători, $x_1 + x_2 + \dots + x_n$ reprezintă fiecare valoare din setul de măsurători și n este numărul de măsurători.

$$s = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}} \quad (8)$$

unde s abaterea standard și x_i reprezintă fiecare valoare din setul de măsurători.

Apoi se verifică dacă bateriile care fac parte din același grup depășesc abaterea standard calculată anterior și, în caz pozitiv, sunt eliminate din grup. După ce toate grupurile au fost verificate și bateriile necorespunzătoare eliminate, se aplică etapa de sortare propriu-zisă pentru o singură baterie din grup, care este cea mai apropiată de valoarea medie, utilizând una din metodele descrise în literatura de specialitate. Starea de sănătate obținută pentru această baterie va caracteriza întreg grupul, reducând astfel timpul de testare total

În funcție de valoarea stării de încărcare a celor două baterii testate se va determina cărei baterii i se aplică impuls de încărcare și căreia de descărcare. Astfel, bateriei cu starea de încărcare mai mică i se va aplica un impuls de încărcare, iar celei cu starea de încărcare mai mare i se va aplica un impuls de descărcare. La sfârșitul procesului de măsurare fiecare baterie primește un identificator format din trei elemente:

- un număr unic de identificare privind chimia bateriei și numărul de ordine în cadrul procesului de măsurare;
- starea de încărcare a bateriei este determinată pe baza modelului dezvoltat;
- rezistența internă determinată după finalizarea testului.

IV.4 Metoda globală de evaluare

Fluxul tehnologic al metodei globale de evaluare a stării de sănătate al bateriilor retrase din uz, din industria auto, este se desfășoară astfel: inițial se măsoară tensiunea de la terminalele bateriilor care este asimilată ca tensiune de circuit deschis (OCV) - această prezumție se verifică prin faptul că se presupune că bateriile testate au un timp de nefuncționare mai mare de o oră; după această etapă, se utilizează valoarea tensiunii de circuit deschis pentru estimarea stării de încărcare (SOC) pe baza modelului dezvoltat; având informația legată de starea de sănătate a bateriilor, se poate determina mai departe care dintre ele va fi descărcată și care încărcată, astfel se poate determina sensul curentului și valoarea sa; impulsul de curent recomandat pentru metoda de determinare a rezistenței interne este de 0.25 C și durează 18 secunde, iar apoi rezistența internă a bateriilor poate fi determinată cu ușurință aplicând legea lui Ohm; după terminarea testului și calcularea rezistenței interne, bateriile sunt codificate conform procedurii prezentate anterior și grupate din 10 mΩ în 10 mΩ. Pentru fiecare grup de baterii format se va aplica o analiză statistică pentru a determina valoarea medie și abaterea standard. Bateriile a căror rezistență internă depășesc abaterea standard vor fi înlăturate din grup și considerate extremități. În schimb, bateria cu valoarea rezistenței interne cea mai apropiată de valoarea medie va fi supusă unei metode lente (EIS, NN,

FL, GPR etc.) de determinare a stării de sănătate, caracterizând astfel întreg grupul de baterii. În acest fel, timpul global de testare a bateriilor este redus semnificativ prin faptul că o singură baterie dintr-un grup este supusă unei evaluări lente, dar cu precizie ridicată.

V. Contribuții privind structura unui sistem de sortare

Structura propusă utilizează două baterii pentru testare. O baterie este folosită ca sursă de alimentare, căreia i se va aplica impulsul de descărcare, iar cealaltă baterie este folosită ca sarcină, căreia i se va aplica impulsul de încărcare. Astfel, sistemul permite testarea a 2N baterii simultan. Mai mult, flexibilitatea sistemului propus permite ca logica de control să fie adaptată și extinsă în funcție de necesități. Sistemul propus respectă cadrul general al sistemelor utilizate în acest domeniu și este prezentat în Figura V-1.

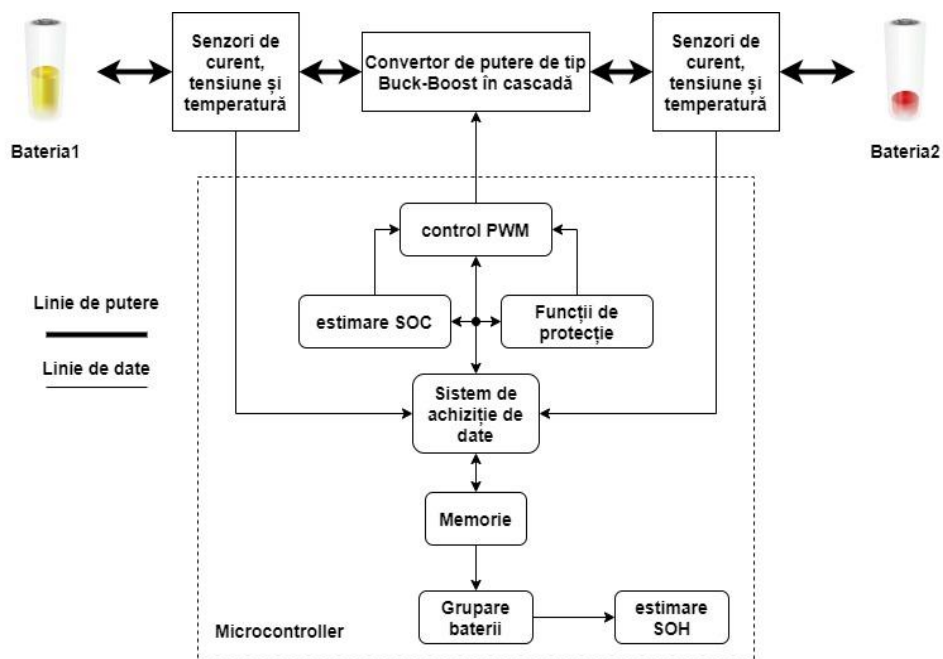


Figura. V-1. Diagrama bloc a sistemului propus pentru determinarea stării de sănătate a bateriilor retrase din uz.

În funcție de parametrii de intrare și de datele achiziționate de la senzori, microcontroller-ul calculează starea de încărcare a bateriilor (SOC) și pe baza rezultatelor determină profilul de testare și valoarea impulsului de curent de încărcare/descărcare sau de tensiune de încărcare, adecvat chimiei bateriilor. De asemenea, microcontroller-ul trebuie să asigure funcționarea corectă și sigură a sistemului pe toată durata testării în caz de supraîncărcare, supradescărcare, supraîncălzire, scurtcircuit sau alte cauze de defecțiune.

După încheierea procedurii de testare, datele obținute se analizează și bateriile se grupează astfel încât grupul să fie cât mai omogen, deci bateriile care aparțin aceluiași grup vor avea

parametri caracteristici cât mai similari. În final, bateriile care nu sunt respinse din cauza inconsistenței sunt evaluate pentru determinarea stării de sănătate (SOH) [67], [68].

V.1 Dimensionarea convertorului de putere Buck-Boost în cascadă

Datorită cererii din ce în ce mai mare a dispozitivelor inteligente care să integreze managementul încărcării și descărcării bateriilor în condiții de siguranță, convertoarele DC-DC bidirecționale au devenit un subiect de interes în literatura de specialitate. Acestea pot menține bateria în parametrii optimi și chiar să îi extindă timpul de funcționare [69]. Uzual, procesul de încărcare-descărcare se realizează cu două circuite separate, însă pentru reducerea dimensiunilor și a costului acest proces poate fi integrat într-un singur circuit. Convertorul Buck-Boost în cascadă permite transferul energiei în ambele sensuri cu posibilitatea ridicării sau coborârii tensiunii, Figura V-2. Avantajul acestei structuri este dat de flexibilitate și eficiență ridicată de până la 97% [70], [71].

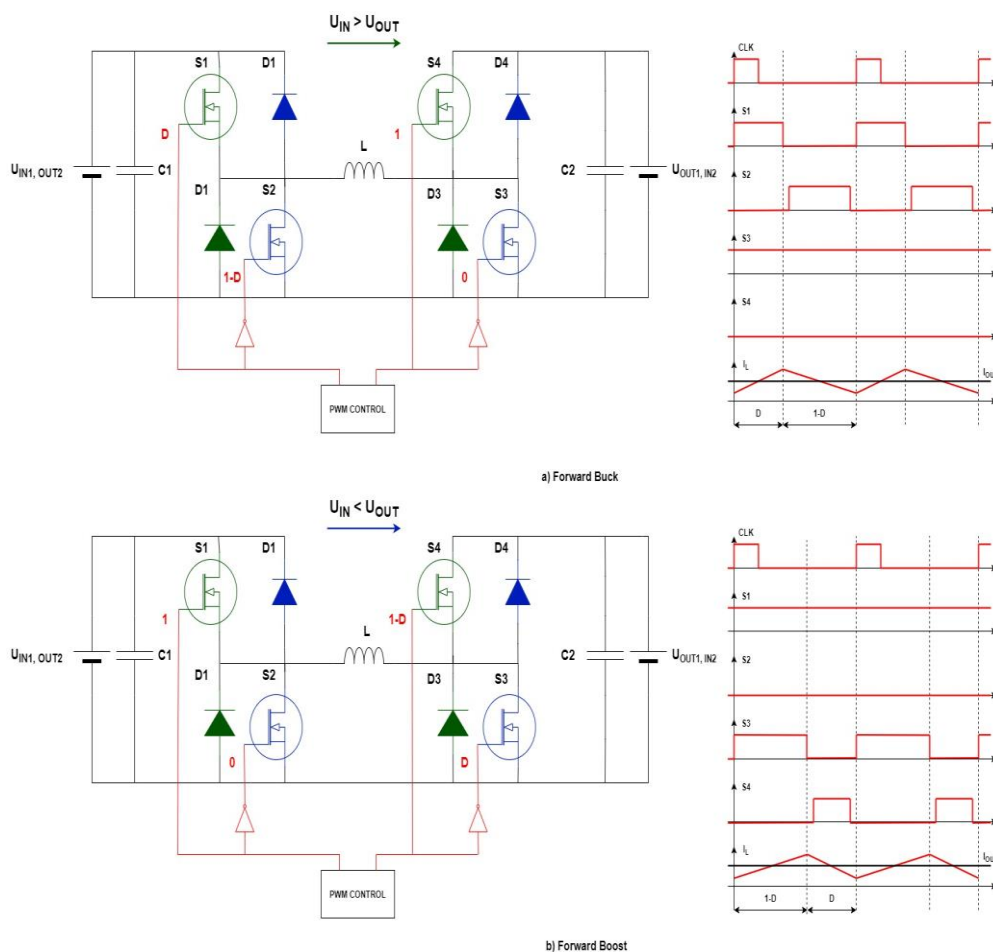


Figura. V-2. Principiul de funcționare al convertorului bidirecțional DC-DC neizolat Buck-Boost în cascadă a) funcționare Buck cadranul I; b) funcționare Boost cadranul I.

Logica de comandă pentru cele cinci scenarii de funcționare, în funcție de valoarea tensiunilor și a stării de încărcare, este definită în Tabelul V-1. După cum se observă, transferul de energie se poate realiza în ambele sensuri, cu posibilitatea funcționării convertorului în regim coborâtor de tensiune (Buck) sau ridicător de tensiune (Boost).

Tabel V-1. Modurile de funcționare ale convertorului DC-DC bidirecțional de tip Buck-Boost în cascadă în funcție de diferența tensiunilor și starea de încărcare a bateriilor.

| Condiție tensiune | Condiție SOC | Mod de operare | S1 | S2 | S3 | S4 |
|------------------------|-------------------------------|--|-----|-----|-----|-----|
| $V_{IN} > V_{OUT}$ | $SOC_{BAT1} > SOC_{BAT2}$ | Buck ($V_{IN1} \rightarrow V_{OUT1}$) | D | 1-D | 0 | 1 |
| $V_{IN} > V_{OUT}$ | $SOC_{BAT1} < SOC_{BAT2}$ | Boost ($V_{IN1} \leftarrow V_{OUT1}$) | 1-D | D | 0 | 1 |
| $V_{IN} < V_{OUT}$ | $SOC_{BAT1} > SOC_{BAT2}$ | Boost ($V_{OUT2} \rightarrow V_{IN2}$) | 1 | 0 | 1-D | D |
| $V_{IN} < V_{OUT}$ | $SOC_{BAT1} < SOC_{BAT2}$ | Buck ($V_{OUT2} \leftarrow V_{IN2}$) | 1 | 0 | D | 1-D |
| $V_{IN} \cong V_{OUT}$ | $SOC_{BAT1} \cong SOC_{BAT2}$ | Buck ($V_{IN1} \rightarrow V_{OUT1}$) | D | 1-D | 0 | 1 |

Pentru dimensionarea circuitului, este nevoie de precizarea specificațiilor circuitului. Astfel, în Tabelul V-2 sunt prezentate caracteristicile de intrare în vederea proiectării elementelor electrice și electronice. Pentru toate rezultatele obținute se va considera cazul cel mai extrem și se vor alege componente astfel încât să asigure funcționarea corectă și în siguranță a convertorului bidirecțional Buck-Boost în cascadă.

Tabel V-2. Specificațiile convertorului DC-DC bidirecțional de tip Buck-Boost în cascadă.

| Specificații | Valoare | Unitate de măsură | Descriere |
|----------------|---------|-------------------|-------------------------------|
| V_{IN_MAX} | 14.5 | [V] | Valoarea DC maximă de intrare |
| V_{IN_MIN} | 2.5 | [V] | Valoarea DC minimă de intrare |
| f_{SW} | 128000 | [Hz] | Frecvența de comutație |
| V_{OUT_MAX} | 14.5 | [V] | Valoarea DC maximă de ieșire |
| V_{OUT_MIN} | 2.5 | [V] | Valoarea DC minimă de ieșire |
| I_{OUT} | 1 | [A] | Curentul maxim de ieșire |

| | | | |
|-----------------------------|------|-----|-----------------------------------|
| Δi_L | 10 | [%] | Valoarea undulațiilor de curent |
| Δv_{OUT} | 5 | [%] | Valoarea undulațiilor de tensiune |
| $V_{SW_MAX} = V_{IN_MAX}$ | 14.5 | [V] | Tensiunea maximă comutată |
| $I_{SW_MAX} = I_{OUT}$ | 1 | [A] | Curentul maxim comutat |
| Randament estimat | 90 | [%] | Eficiența conversiei |

Ecuatiile pentru calcularea elementelor urmăresc procedura de proiectare prezentată în [72], [73], [74] în vederea dimensionării unui convertor bidirecțional DC-DC de tip Buck-Boost în cascadă cu modul de operare în conducție continuă (CCM – Continuous Conduction Mode). Având în vedere rezultatele obținute pentru elementele considerate, precum și disponibilitatea acestora în momentul achiziționării, s-au ales următoarele componente electronice:

Tabel V-3. Componentele alese pentru realizarea convertorului DC-DC bidirecțional de tip Buck-Boost în cascadă.

| Tip componentă | Denumire | Producător | Caracteristici | Nr. bucăți |
|--------------------------------|--------------------|-------------------|---|------------|
| Bobină [75] | 74437529203221 | Würth Elektronik | $L = 220 \pm 20\% \mu H$ $I_L = 8.8A$ | 1 |
| Condensator [76] | 875115655003 | Würth Elektronik | $C = 100 \pm 20\% \mu F$ $V_{MAX_C} = 35V$ | 2 |
| Diodă [77] | IRF530SPBF | Vishay | $V_{DS} = 100V$ | 4 |
| MOSFET [77] | | | $I_{Smax} = I_{F_AVG} = 14A$ | |
| Driver MOSFET [78] | LTC4444 | Linear Technology | $V_{IN} = 0 - 100V$ $I_{max} = 2.5A$ | 2 |
| Condensator Driver MOSFET [79] | T499A224K035ATE18K | Kemet | $C = 0.22 \pm 10\% \mu F$ $V_{MAX_C} = 35V$ | 2 |

| | | | | |
|----------------------------------|-------------|------|-----------------------------------|--|
| Diodă Schottky Driver [80] | RB075BGE40S | Rohm | $V_{RRM} = 40V$ $I_{AVG} = 5A$ | |
|----------------------------------|-------------|------|-----------------------------------|--|

Deoarece curentul și tensiunea de comandă a MOSFET-ului depășesc capacitățile pinilor PWM pentru majoritatea circuitelor de comandă a fost necesar să alegem un driver special conceput pentru comanda unui braț de punte.

V.2 Simularea subsistemului electronic pentru convertorul de putere Buck-Boost în cascadă

Pentru testarea circuitului dimensionat am utilizat programul LTspice XVII care este un software de simulare SPICE de înaltă performanță capabil să permită vizualizarea formelor de undă pe baza modelelor reale ale circuitelor analogice și integrate. În scopul obținerii unor rezultate cât mai calitative, macromodelele elementelor utilizate implementează specificațiile componentelor electrice și electronice alese în Tabelul V-3. În Figura V-3 este prezentată schema circuitului de putere care simulează funcționarea convertorului DC-DC bidirecțional de tip Buck-Boost în cascadă. Schema de comandă este realizată cu ajutorul a două surse care generează un semnal PWM necesar pentru generarea parametrilor de control furnizați de drivele de putere. Analiza funcționării circuitului se realizează pe baza a opt scenarii care vizează limitările funcționării circuitului:

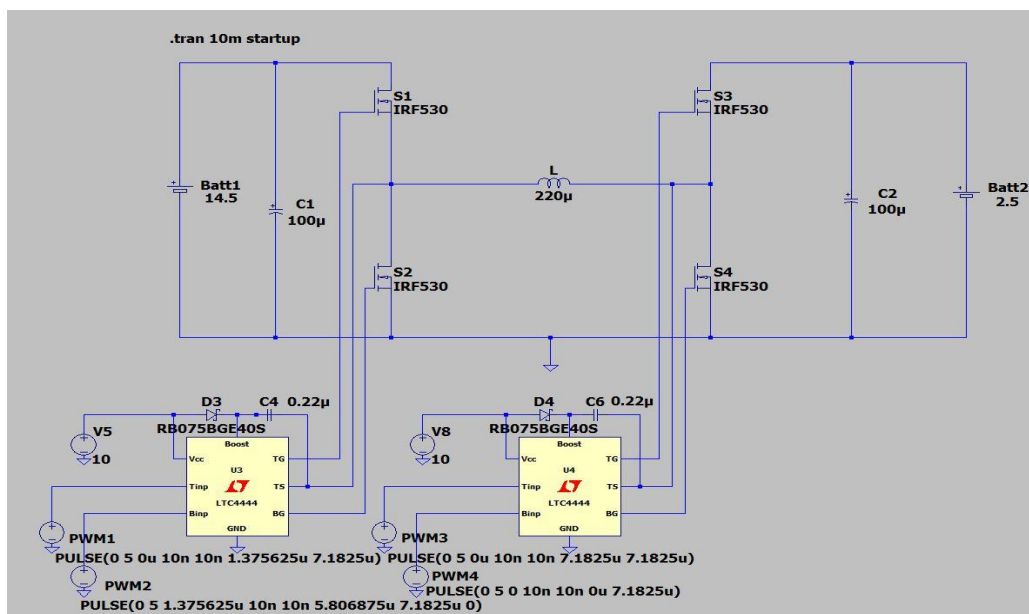


Figura. V-3. Schema de forță și de control a convertorului bidirecțional DC-DC de tip Buck-Boost în cascadă implementată în LTspice XVII.

V.3 Simularea funcționării sistemului de sortare

Programul LTspice a permis evaluarea sistemului din punctul de vedere al comportamentului circuitelor integrate și al elementelor de circuit pasive. Cu toate acestea, comportamentul real al bateriilor nu s-a putut realiza, existând doar un model generic pentru inserarea tensiunii furnizate și a componentei parazite de tip RC. Astfel, s-a abordat studiul sistemului din punct de vedere al comportamentului bateriilor prin implementarea acestora cu ajutorul blocurilor funcționale disponibile în Matlab/Simulink. Acest program, permite modelarea, simularea și analiza sistemelor dinamice. Blocurile predefinite pot fi utilizate pentru modelarea sistemelor liniare sau neliniare, continue sau discrete în timp. În Figura V-4, se prezintă modelul Simulink utilizat pentru studiul sistemului de determinare a stării de sănătate a bateriilor retrase din industria auto.

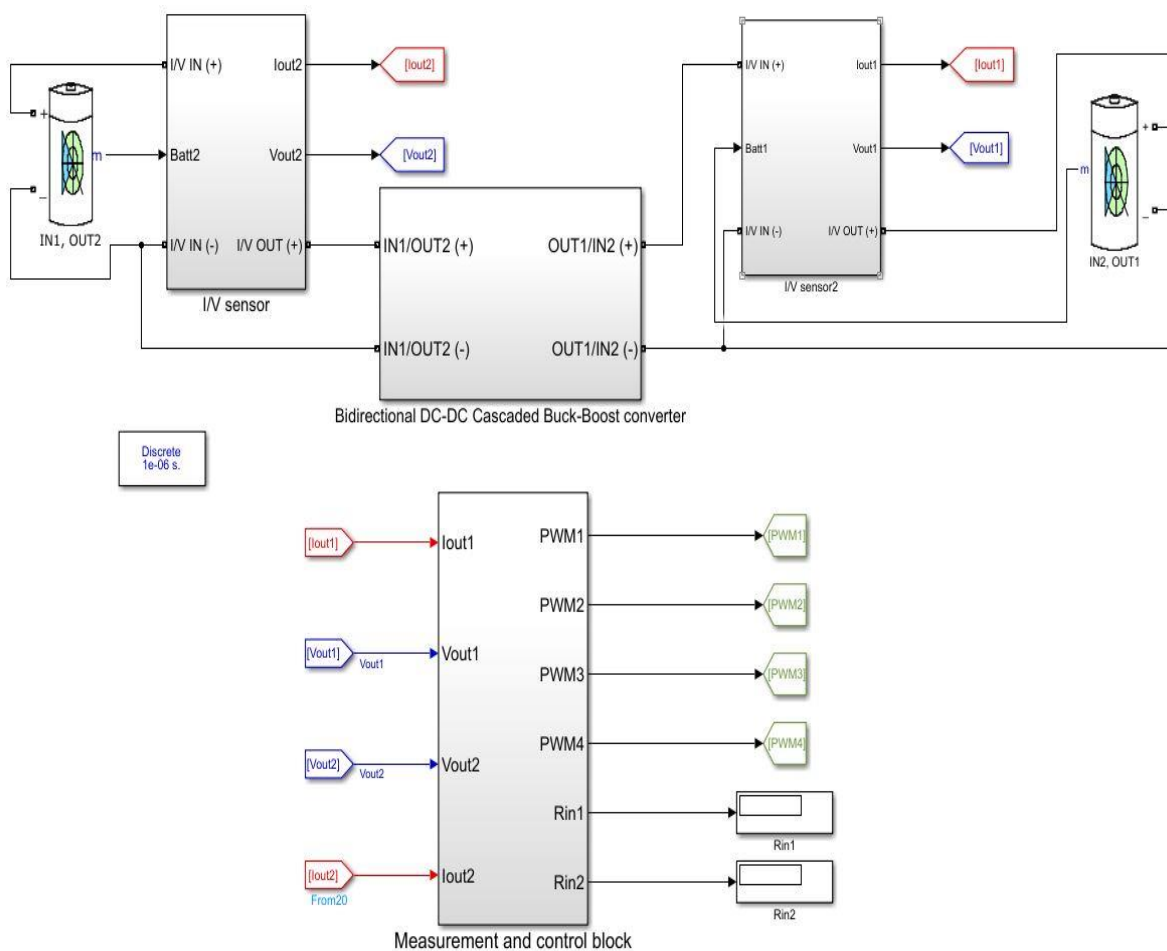


Figura. V-4. Diagrama blocurilor funcționale implementată în Matlab/Simulink.

Pentru determinarea datelor experimentale necesare modelării bateriilor în MATLAB/Simulink, care implementează modelul Shepherd, s-au achiziționat datele a două loturi,

de câte cinci baterii fiecare și de la producători diferiți (APR și BSE). Astfel, conform procedurii prezentate în manualul USABC s-au determinat curbele de descărcare la C1/1, C2/2 și C3/3, precum și capacitatea efectivă a fiecărei baterii [52]. Procedura a fost aplicată cu echipamente de laborator de trei ori pentru o singură baterie, la o temperatură de $23^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$. Capacitatea bateriei este considerată stabilă atunci când trei descărcări succesive C3/3 prezintă o toleranță maximă de 2%. Capacitatea se determină utilizând următoarea relație:

$$C_{ef} = I_{dchg} \cdot t_{dchg} [\text{Ah}] \quad (9)$$

unde C_{ef} este capacitatea efectivă [Ah], I_{dchg} este curentul de descărcare [A], și t_{dchg} este durata de timp până în momentul în care tensiunea a atins valoarea limită de descărcare (cut-off voltage) [s].

Astfel, punctele caracteristice din curba de descărcare C3/3 au fost extrase pentru a îndeplini parametrii necunoscuți descriși în ecuația (10) și implementați în modelul bateriei pentru a obține un comportament realist în timpul simulărilor. Conform [81], modelul Shepherd implementează comportamentul electro-chimic al unei baterii și poate fi descris după cum urmează:

$$V = E_0 - K \cdot \left(\frac{Q}{Q - it} \right) \cdot i - R \cdot i + A \cdot E^{(-B \cdot it)} \quad (10)$$

unde E_0 reprezintă tensiunea de circuit deschis (OCV) la capacitatea maximă [V], K este coeficientul de rezistență la polarizare [Ω], Q este capacitatea bateriei [Ah], i este curentul bateriei [A], R este rezistența internă, it este capacitatea de descărcare [Ah], A și B sunt constante empirice [V], [1/Ah].

Ecuațiile lui Sheperd pentru modelarea bateriilor necesită un număr limitat de parametri, aceștia pot fi obținuți din datele producătorului bateriei sau pe baza unui set experimental de date. Mai mult, aceste ecuații fac deja parte din modelul bateriei regăsit în programul Matlab/Simulink și prin urmare algoritmul propus poate fi extins pentru orice tehnologie prin introducerea coordonatelor punctelor marcate din caracteristica nominală de descărcare [82], [83].

Pentru elaborarea experimentelor s-au utilizat următoarele echipamente: o sursă de alimentare programabilă de curent continuu care să implementeze profilul de încărcare CC/CCCV; o sarcină electronică programabilă de curent continuu pentru implementarea profilurilor de descărcare; o cameră termică pentru asigurarea condițiilor de testare propuse de producător; un sistem de achiziție de date cu rezoluție ridicată; un circuit specializat conceput pentru măsurarea stării de încărcare; și un calculator personal pentru realizarea softului de control al plăcii de achiziții de date, Figura V-5.

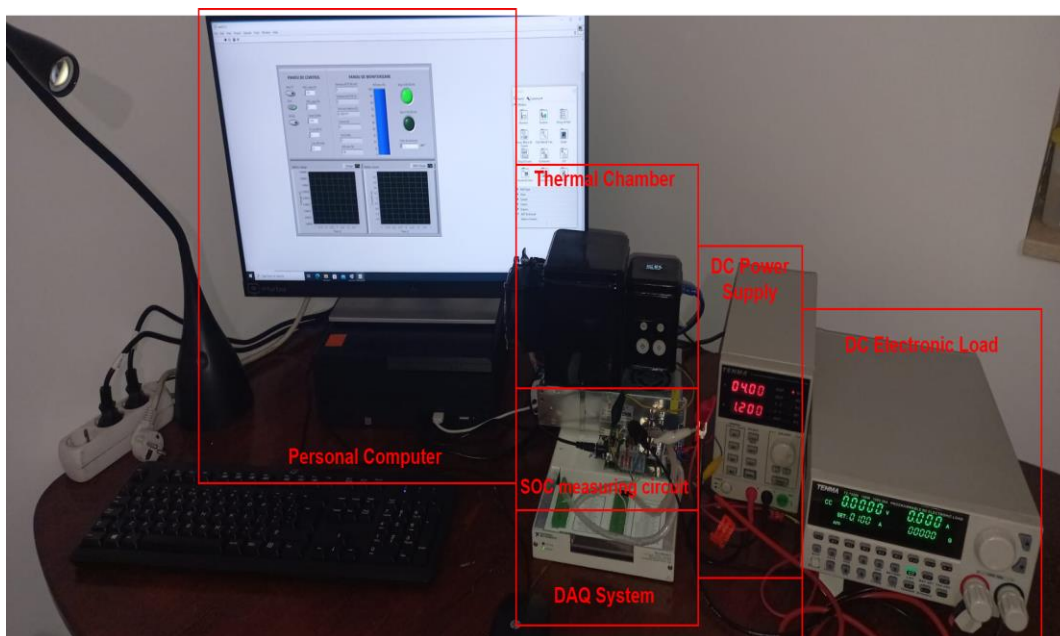


Figura. V-5. Schema de montaj pentru elaborarea testelor.

După calcularea capacității efective a fost nevoie să se verifice, conform manualului USABC, dacă diferența între valoarea obținută și cea nominală este mai mare de 2%. În cazul în care se identifică o eroare mai mare de 2% atunci bateriile vor fi eliminate din studiu.

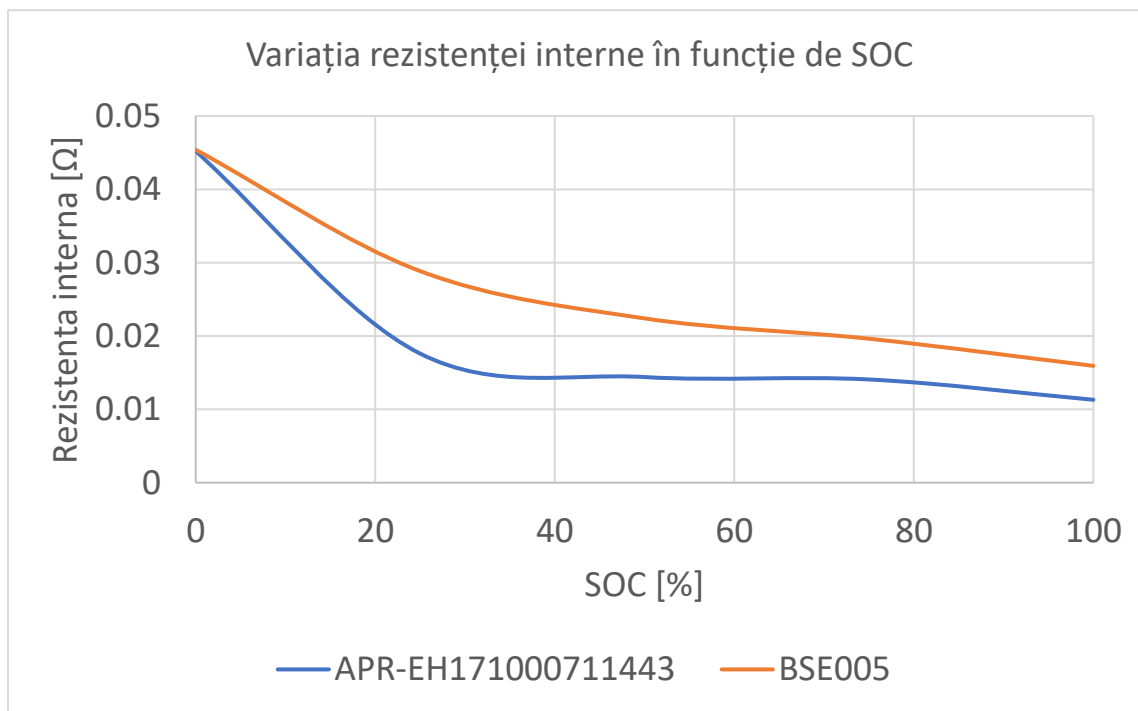


Figura. V-6. Variația rezistenței interne în funcție de SOC pentru bateria BSE005 și APR-EH171000711443.

V.4 Proiectarea plăcii de testare pentru circuitul de forță

39

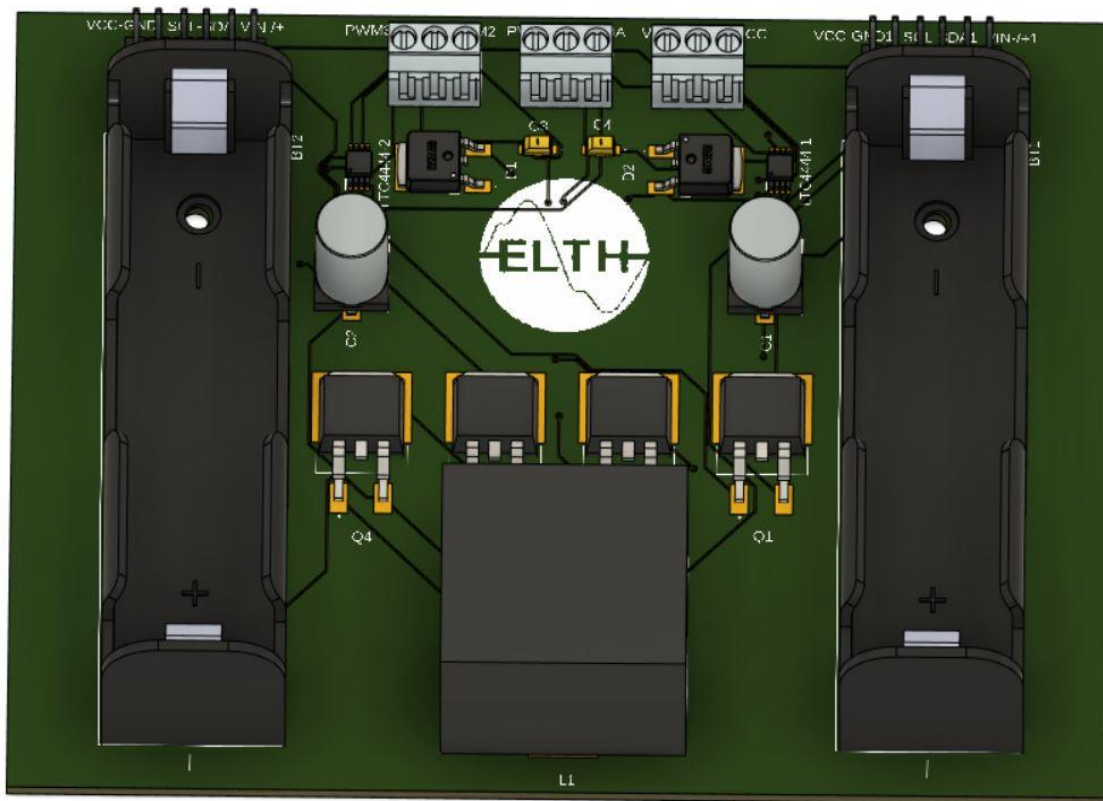


Figura. V-8. Vizualizarea schemei de forță în format 3D.

Figura V-8 permite vizualizarea plăcii de testare și modul în care componentele au fost amplasate în format 3D. Generarea circuitului în format tridimensional eficientizează etapa de proiectare prin oferirea unei perspective clare asupra circuitului proiectat, precum și vizualizarea posibilelor greșeli de amplasare a componentelor.

V.5 Realizarea sistemului de comandă și control

Elementul de comandă și control se realizează cu ajutorul unui microcontroller. Acesta este responsabil de prelucrarea datelor, monitorizarea bateriilor și controlul circuitului de forță. În plus, din punct de vedere software programul implementează funcții de protecție la supraîncărcare, supradescărcare, scurtcircuit etc. Pentru elaborarea sistemului de comandă și control se vor utiliza microcontroller-ul ESP32, precum și alte componente necesare pentru realizarea interfeței cu utilizatorul, ecran LCD, butoane etc. Acest microcontroller a fost ales din următoarele motive: permite generarea semnalelor PWM de frecvențe foarte înalte având un generator de ceas de 240MHz; interfață I2C pentru comunicarea cu senzori, precum și alte posibilități de comunicare (UART, SPI, Wi-Fi, Bluetooth); memorie extinsă pentru dezvoltări laborioase, memorie ROM 448kB și RAM 520kB [84]. Schema electrică a sistemului este prezentată în Figura V-9.

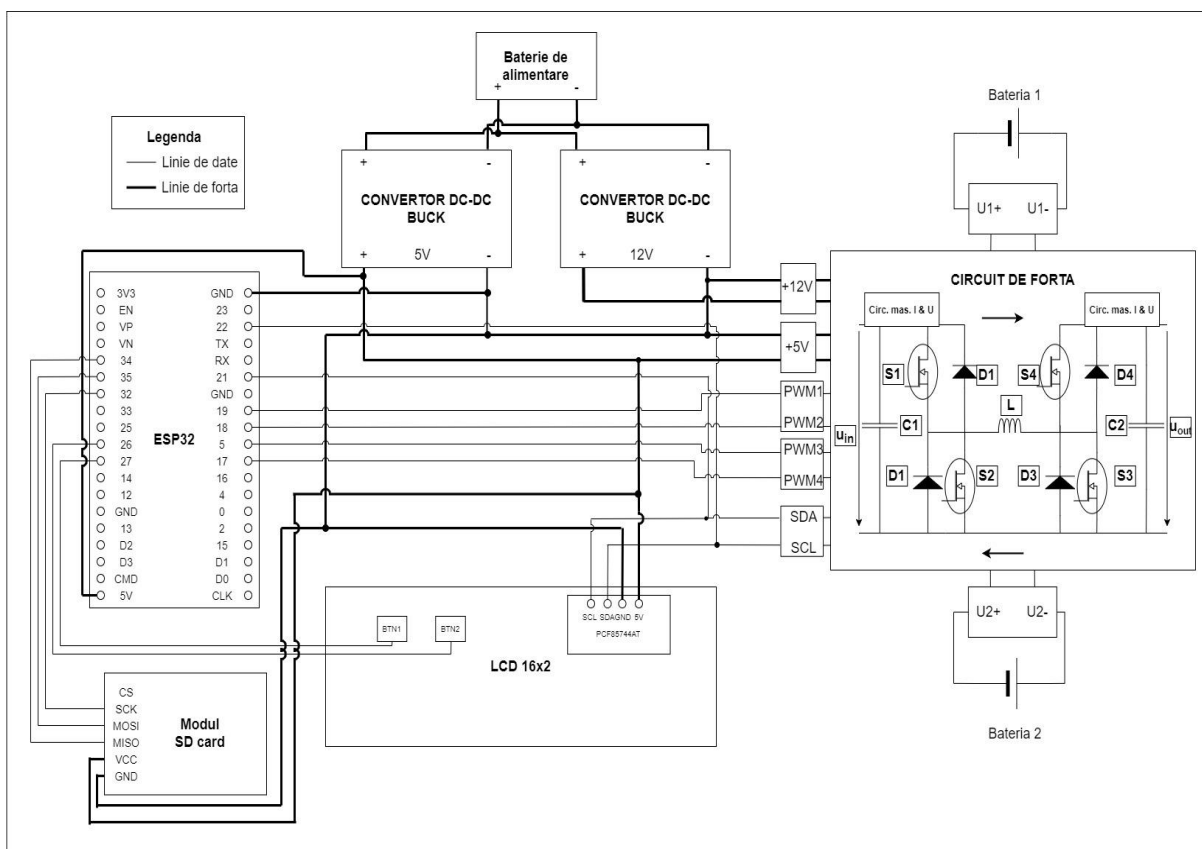


Figura. V-9. Schema electrică a sistemului propus (circuit de comandă și circuit de forță).

Logica de comandă implementată în cadrul microcontroller-ului ESP32 prevede: inițializarea procesului de testare prin intermediul unui comutator general care alimentează întreg circuitul, aceasta având și rol de protecție în caz de avarie; după acționarea comutatorului general, se execută secvența de cod care apelează librăriile corespunzătoare fiecărei componente, se citesc variabilele globale din memoria ROM și se inițializează configurația obiectelor; în bucla principală a codului se configurează pinii de intrare/ieșire (PWM, SDA, SCL, DAC, ADC), precum și starea lor (HIGH, LOW), dacă este cazul, și se stabilește comunicarea cu dispozitivele - secvența de introducere a parametrilor de testare nu se poate inițializa până când comunicația nu este stabilă, dispozitivul va repeta secvența de stabilire a comunicației până ce aceasta este validă; în faza de inițializare a procedurii se așteaptă din partea utilizatorului să se aleagă tipul de test, DCR Test sau Grouping Test după care acesta este aplicat până la inițializarea unei noi secvențe de testare. DCR Test reprezintă secvența prin care se evaluează rezistența internă a bateriilor și necesită introducerea următorilor parametri de intrare: alegerea chimiei bateriilor (LFP, NMC, LiPo etc.) și a capacității (900 mAh, 1100 mAh etc.). După ce se aprobă începerea testului există o primă etapă de verificare a intervalului capacității, iar apoi urmează etapa de pretestare. În această fază se apelează funcția de măsurare a tensiunii de circuit deschis (OCV) în vederea determinării stării de încărcare (SOC) a bateriilor pe baza modelelor dezvoltate anterior. Tot aici, se calculează

impulsul de curent ca $C/4$ din capacitate, se determină care baterie va fi încărcată și care descărcată și modul de operare al convertorului de putere (FW Buck, RE Boost, RE Buck, FW Boost). După această etapă de pretestare se pornește un numărător pentru 18 secunde, timp în care se aplică impulsul de curent de încărcare/descărcare. Pe toată durata impulsului se monitorizează tensiunea și curentul bateriilor. După terminarea numărătorului, circuitul de forță se oprește și se trece la prelucrarea datelor. În această ultimă etapă se calculează rezistența internă a bateriilor și se trimit datele salvate către un calculator pentru aplicarea algoritmului de determinare a stării de sănătate a bateriilor sau se încarcă datele pe un card SD, după care se revine la faza de inițializare a procedurii. În cazul în care se selectează opțiunea Grouping Test, adică după evaluarea tuturor bateriilor din situl de lucru, atunci se accesează fișierul încărcat pe cardul SD și se rulează funcția de grupare a bateriilor. Pentru măsurarea curentului se folosește modulul INA219 care are o precizie de măsurare de 1%, cu un convertor analog-digital de 12 biți și o rezoluție de măsurare a curentului de 0.1 mA [85]. De asemenea, interfața cu utilizatorul s-a realizat cu ajutorul unui LCD 16x2 cu butoane pentru navigarea prin meniu și interfața de comunicație I2C [86].

VI. Dezvoltarea codului sursă pentru sortarea bateriilor

Înainte de realizarea fizică a circuitului și implementarea algoritmului de control s-a considerat simularea schemei cu ajutorul platformei Wokwi. Această platformă este un emulator electronic online care permite integrarea și simularea diferitelor componente electronice precum: ESP32, butoane, senzorul de curent și tensiune INA219, elemente pasive de circuit, LCD etc.

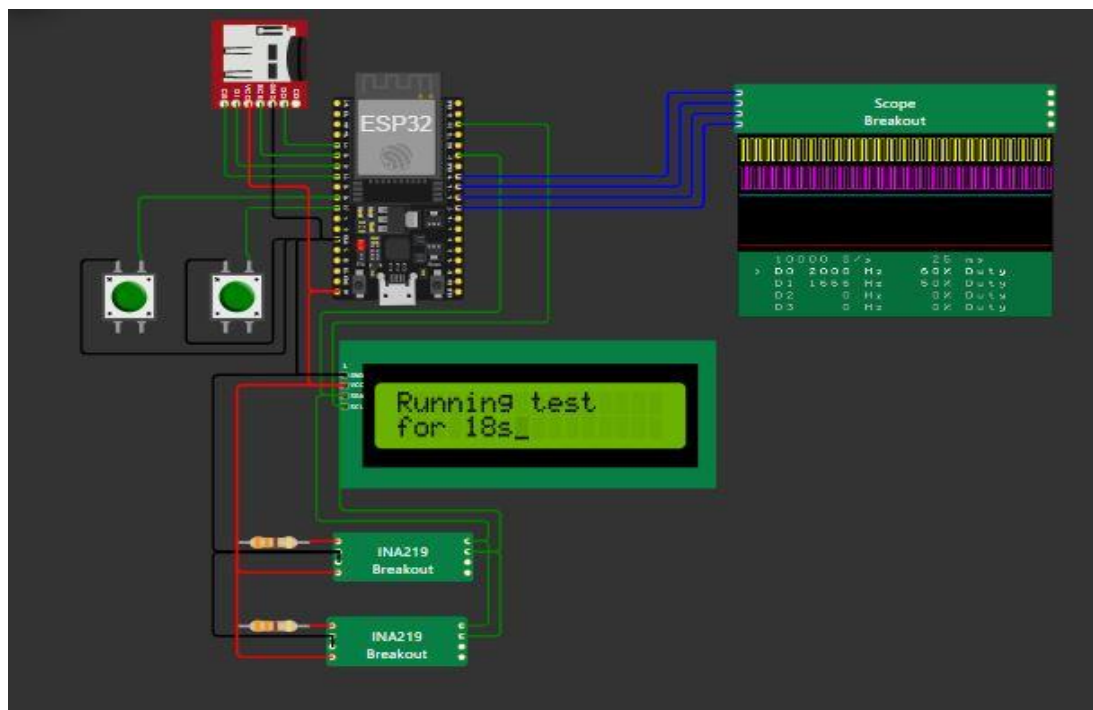


Figura. VI-1. Schema circuitului implementată în platforma Wokwi.

În vederea determinării relației SOC – OCV s-a utilizat codul următor. Inițial sunt apelate funcțiile de măsurare ale senzorilor INA219 și se salvează tensiunea de la bornele bateriilor asimilată ca tensiune de circuit deschis (OCV). De amintit că în această fază a procedurii de testare nu se comandă comutatoarele de putere. Apoi, starea de încărcare (SOC) a celor două baterii testate este determinată cu ajutorul modelului prezentat anterior. În cazul în care starea de încărcare determinată depășește pragul de 100% sau 10% atunci valoarea este saturată. În final, se determină modul în care va funcționa convertorul de putere în funcție de SOC și OCV al celor două baterii, conform scenariilor de funcționare prezentate înainte.

```

measurement1(); // acquire OCV from battery 1
measurement2(); // acquire OCV from battery 2
OCV1 = loadvoltage1;
OCV2 = loadvoltage2;
Serial.print("OCV1 [V]: "); Serial.print(OCV1); Serial.println(" ");
Serial.print("OCV2 [V]: "); Serial.print(OCV2); Serial.println(" ");
SOC1 = (-a4*pow(OCV1, 4) + a3*pow(OCV1,3) - a2*pow(OCV1, 2) +
a1*pow(OCV1, 1) - a0);
SOC2 = (-a4*pow(OCV2, 4) + a3*pow(OCV2,3) - a2*pow(OCV2, 2) +
a1*pow(OCV2, 1) - a0);
Serial.print("SOC1 [%]: "); Serial.print(SOC1); Serial.println(" ");
Serial.print("SOC2 [%]: "); Serial.print(SOC2); Serial.println(" ");
if (SOC1 > SOC_UpLimit) {SOC1 = SOC_UpLimit;}
if (SOC1 < SOC_LowLimit) {SOC1 = SOC_LowLimit;}
if (SOC2 > SOC_UpLimit) {SOC2 = SOC_UpLimit;}
if (SOC2 < SOC_LowLimit) {SOC2 = SOC_LowLimit;}
if ((SOC1 > SOC2) && (OCV1 > OCV2)) { // FW Buck
    FWbuck = 1;
    Serial.println("Forward Buck"); Serial.println(" ");
}
if ((SOC1 < SOC2) && (OCV1 > OCV2)) { // RE Boost
    REboost = 1;
    Serial.println("Reverse Boost"); Serial.println(" ");
}
if ((SOC1 > SOC2) && (OCV1 < OCV2)) { // RE Buck
    REbuck = 1;
    Serial.println("Reverse Buck"); Serial.println(" ");
}
if ((SOC1 < SOC2) && (OCV1 < OCV2)) { // FW Boost
    FWboost = 1;
    Serial.println("Forward Boost"); Serial.println(" ");
}

```

VII. Rezultate și concluzii

În cadrul tezei de doctorat s-au studiat mai multe metode de sortare pentru baterii și în urma realizării unui studiu comparativ care vizează timpul de operare, eroarea de determinare a SOH, avantaje și dezavantaje, s-a stabilit că metoda bazată pe determinarea rezistenței interne în curent continuu este cea mai potrivită din punctul de vedere al timpului de operare și aplicării acesteia pe scară largă. Astfel, această metoda se aplică ca o etapă intermediară care grupează bateriile în funcție de rezistența internă, urmând ca o singură baterie dintr-un grup să fie testată în continuare pentru a determina vârsta reală a grupului. Mai departe, s-a realizat o analiză multi-criterială a convertoarelor de putere bidirecționale de tip DC-DC pentru care s-a stabilit că topologia Buck-Boost în cascadă reprezintă soluția optimă pentru realizarea unui sistem de testare care să permită evaluarea rapidă a bateriilor de diferite tehnologii. Așadar. În Figura VII-1 se prezintă vederea de sus a prototipului realizat.



Figura. VII-1. Prototipul sistemului propus (vedere de sus).

În vederea validării metodei și a sistemului s-au utilizat zece celule LFP, împărțite în patru subloturi, pentru care inițial s-a determinat capacitatea efectivă conform procedurii descrise în manualul USABC. Astfel, fiecare celulă a fost supusă unei secvențe de testare alcătuită din trei cicluri de descărcare la curent constant. Un ciclu de descărcare implică utilizarea a trei curenți de valori $C3/3$, $C2/2$ și $C1/1$. După fiecare etapă de descărcare bateria a fost lăsată timp de o oră pentru stabilizarea tensiunii de la borne, iar apoi a fost încărcată conform specificațiilor

producătorului prin metoda CCCV. Această procedură a fost repetată de trei ori pentru fiecare baterie în parte, iar capacitatea obținută pentru ciclul C3/3 s-a considerat ca fiind capacitatea efectivă a bateriilor.

Plecând de la aceste date experimentale s-a trecut la îmbătrânirea celulelor folosind procedura de testare cunoscută sub denumirea de Random Walking [87], [88]. Această procedură presupune aplicarea unei succesiuni aleatorii de curenți de descărcare și de încărcare, fiecare cu durată de 5 minute, pornindu-se de la o baterie complet încărcată. Secvența de testare este formată din 12 pași pentru o oră, respectiv 96 de pași pentru o zi (8 ore). În figura VII-2 este prezentat profilul de descărcare Random Walking implementat cu ajutorul unei surse de putere și a unei sarcini electronice. Inițial, se aplică un curent de descărcare maxim de -2.25A , iar apoi din 5 în 5 minute, cu pauze de o secundă, valoarea curentului devine -1.875A , -1.5A , -1.125A , -0.75A , respectiv -0.375A . După această secvență se aplică un curent de încărcare de la valoarea minimă către cea maximă.

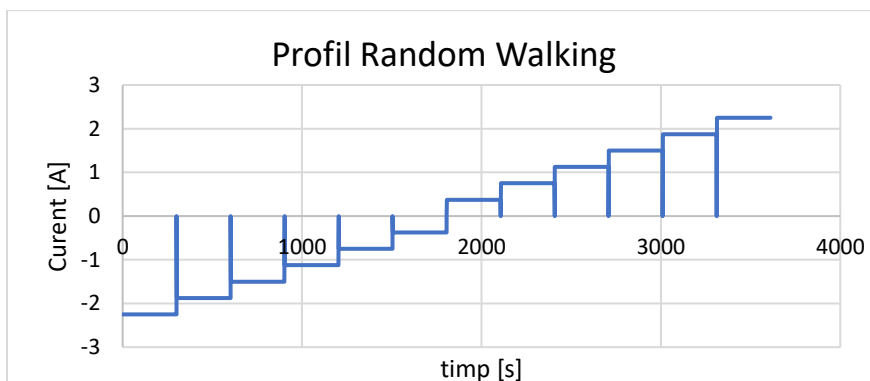


Figura. VII-2. Profilul Random Walking utilizat pentru îmbătrânirea celulelor.

Lotul de zece baterii a fost împărțit în patru subploturi după cum urmează: bateriile APR-EH171000702406 și APR-EH171000707606 fac parte din primul subplot și vor fi îmbătrânite până la starea de sănătate de 95%; bateriile APR-EH171000705424 și APR-EH171000711443 vor alcătui subplotul 2 care va fi îmbătrânit la aproximativ 92% SOH; bateriile APR-EH171000814013, APR-EH171000708804 și APR-EH171000707901 alcătuiesc subplotul 3 care va fi îmbătrânit la aproximativ 88% SOH; și bateriile APR-EH171000714657, APR-EH171000711199 și APR-EH171000701957 vor face parte din subplotul 4 care va fi îmbătrânit la aproximativ 86% SOH. Valorile SOH stabilite au fost alese astfel încât să testeze sistemul propus în vederea identificării a cel puțin patru grupuri de baterii. De asemenea, se observă o diferență de 2%, 3% și 5% între pragurile SOH alese. În urma aplicării profilului Random Walking s-au obținut noile valori SOH prezentate în Tabelul VII-1.

Tabel VII-1. Valorile SOH ale bateriilor îmbătrânite după aplicarea profilului Random Walking.

| ID Baterie | Capacitatea nominală [mAh] | Capacitatea efectivă [mAh] | Starea de sănătate actuală [%] | Sublot |
|------------|----------------------------|----------------------------|--------------------------------|--------|
|------------|----------------------------|----------------------------|--------------------------------|--------|

| | | | | |
|--------------------------------|------|--------|-------|---|
| APR- EH171000702406 | 1100 | 1053.0 | 95.72 | 1 |
| APR- EH171000707606 | | 1049.6 | 95.41 | 1 |
| APR- EH171000705424 | | 1009.6 | 91.78 | 2 |
| APR- EH171000711443 | | 1015.4 | 92.30 | 2 |
| APR- EH171000814013 | | 976.4 | 88.76 | 3 |
| APR- EH171000708804 | | 971.9 | 88.35 | 3 |
| APR- EH171000707901 | | 966.0 | 87.81 | 3 |
| APR- EH171000714657 | | 947.32 | 86.12 | 3 |
| APR- EH171000711199 | | 945.01 | 85.91 | 4 |
| APR- EH171000701957 | | 944.46 | 85.86 | 4 |

Fiecare etapă de testare implică verificarea a două baterii cu diferite valori SOH și SOC. Conform discuțiilor anterioare bateriile vor fi depozitate astfel: încărcate conform procedurii de depozitare, pentru care se va considera SOC 40%; parțial încărcate în urma depozitării de lungă durată, pentru care se va considera SOC 80%; și încărcate – SOC 95%-100%. Astfel, în vederea validării sistemului se vor considera următoarele scenarii de funcționare:

1. Scenariul 1: Bateria 1 SOH 86% - SOC 80%, Bateria 2 SOH 88% - SOC 80%, regim de funcționare FW Buck;
2. Scenariul 2: Bateria 1 SOH 86% - SOC 95%, Bateria 2 SOH 95% - SOC 40%, regim de funcționare RE Buck;
3. Scenariul 3: Bateria 1 SOH 88% - SOC 95%, Bateria 2 SOH 92% - SOC 40%, regim de funcționare RE Buck;
4. Scenariul 4: Bateria 1 SOH 86% - SOC 80%, Bateria 2 SOH 92% - SOC 40%, regim de funcționare FW Buck;
5. Scenariul 5: Bateria 1 SOH 88% - SOC 80%, Bateria 2 SOH 95% - SOC 40%, regim de funcționare FW Buck.

În vederea verificării rezultatelor obținute s-au efectuat două seturi de date, Tabelul VII-2 și VII-3, pentru care s-a calculat eroarea relativă a rezistenței interne a bateriilor. Datele obținute pentru verificare vor fi utilizate în vederea validării metodei de sortare.

Tabel VII-2. Date experimentale obținute în urma aplicării algoritmului de determinare a rezistenței interne a bateriilor.

| Scenariul | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|-----------------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| ID1 | LFP1100_001 _78_085 | LFP1100_003 _94_083 | LFP1100_005 _92_072 | LFP1100_007 _81_080 | LFP1100_009 _77_077 |
| ID2 | LFP1100_002 _80_075 | LFP1100_004 _41_045 | LFP1100_006 _37_056 | LFP1100_008 _40_058 | LFP1100_010 _39_048 |
| Tehnologie | LFP | | | | |
| Capacitate [mAh] | 1100 | | | | |
| Ipulse [A] | ± 0.375 | | | | |
| OCV1 [V] | 3.319 | 3.340 | 3.338 | 3.323 | 3.318 |
| OCV2 [V] | 3.322 | 3.267 | 3.259 | 3.265 | 3.263 |
| SOC1 [%] | 78.07 | 94.29 | 92.77 | 81.17 | 77.29 |
| SOC2 [%] | 80.40 | 41.96 | 37.62 | 40.84 | 39.74 |
| Vdt1 [V] | 0.032 | 0.031 | 0.027 | 0.030 | 0.029 |
| Vdt2 [V] | 0.029 | 0.017 | 0.021 | 0.022 | 0.018 |
| Rin1 [Ω] | 85.79 | 83.11 | 72.39 | 80.43 | 77.75 |
| Rin2 [Ω] | 75.07 | 45.45 | 56.15 | 58.82 | 48 |

Tabel VII-3. Date experimentale obținute pentru verificarea rezistenței interne a bateriilor.

| Scenariul | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| ID1 | LFP1100_011 _78_082 | LFP1100_013 _94_085 | LFP1100_015 _92_072 | LFP1100_017 _78_080 | LFP1100_019 _78_074 |

| | | | | | |
|-----------------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| ID2 | LFP1100_012 _79_077 | LFP1100_014 _42_048 | LFP1100_016 _38_058 | LFP1100_018 _43_056 | LFP1100_020 _40_045 |
| Tehnologie | LFP | | | | |
| Capacitate [mAh] | 1100 | | | | |
| Ipulse [A] | ± 0.375 | | | | |
| OCV1 [V] | 3.319 | 3.34 | 3.338 | 3.319 | 3.319 |
| OCV2 [V] | 3.321 | 3.268 | 3.26 | 3.27 | 3.265 |
| SOC1 [%] | 78.07 | 94.29 | 92.77 | 78.07 | 78.07 |
| SOC2 [%] | 79.62 | 42.53 | 38.14 | 43.69 | 40.84 |
| Vdt1 [V] | 0.031 | 0.032 | 0.027 | 0.030 | 0.028 |
| Vdt2 [V] | 0.027 | 0.018 | 0.022 | 0.021 | 0.017 |
| Rin1 [Ω] | 82.67 | 85.56 | 72 | 80.43 | 74.67 |
| Rin2 [Ω] | 77.33 | 48.13 | 58.98 | 56.15 | 45.33 |

Rezultatele obținute din al doilea set de date va fi utilizat în continuare pentru validarea metodei de grupare. Așadar, s-au format grupuri de baterii din 10 în 10 m Ω , începând cu bateria cu rezistența internă cea mai mică, iar acestea sunt prezentate în Tabelul VII-4:

Tabel VII-4. Grupurile de baterii formate în urma sortării.

| | ID baterie | Rezistență internă [mΩ] |
|-----------------|--------------------|--|
| Grupul 1 | LFP1100_001_84_085 | 85.79 |
| | LFP1100_013_94_085 | 85.56 |
| Grupul 2 | LFP1100_007_81_080 | 80.43 |
| | LFP1100_009_77_077 | 77.75 |
| | LFP1100_003_95_083 | 83.11 |
| | LFP1100_011_78_082 | 82.67 |

| | | |
|-----------------|--------------------|-------|
| | LFP1100_012_79_077 | 77.33 |
| | LFP1100_017_78_080 | 80.43 |
| Grupul 3 | LFP1100_004_40_045 | 45.45 |
| | LFP1100_010_39_048 | 48 |
| | LFP1100_014_42_048 | 48.13 |
| | LFP1100_020_40_045 | 45.33 |
| Grupul 4 | LFP1100_006_37_056 | 56.15 |
| | LFP1100_008_40_058 | 58.82 |
| | LFP1100_016_38_058 | 58.98 |
| | LFP1100_018_43_056 | 56.15 |
| Grupul 5 | LFP1100_005_92_072 | 72.39 |
| | LFP1100_015_92_072 | 72 |
| | LFP1100_002_80_075 | 75.07 |
| | LFP1100_019_78_074 | 74.67 |

Intervalele obținute sunt: 45.33-55.33 mΩ, 55.33-65.33 mΩ, 65.33-75.33 mΩ, 75.33-85.33 mΩ, 85.33-95.33 mΩ. Astfel, bateriile au fost sortate în cinci grupuri diferite. În continuare, pentru fiecare grup s-au calculat valoarea medie și abaterea standard pentru care s-a verificat dacă există erori grosolane aflate în afara intervalului $\pm\sigma$. După această etapă, s-a verificat care baterie are rezistența internă cea mai apropiată de valoarea medie, astfel încât o singură baterie să fie supusă procesului de evaluare a SOH. Rezultatele obținute sunt prezentate în Tabelul VII-5.

Tabel VII-5. Rezultate obținute după aplicarea metodei de grupare.

| | Grupul 1 | Grupul 2 | Grupul 3 | Grupul 4 | Grupul 5 |
|-------------------------------------|--|--|--|--|--|
| Medie [mΩ] | 85.67 | 80.28 | 46.72 | 57.52 | 73.53 |
| Abatere [mΩ] | 0.16 | 2.40 | 1.54 | 1.58 | 1.56 |
| Interval valori [mΩ] | 85.51-85.83 | 77.88-82.68 | 45.18-48.27 | 55.93-59.11 | 71.97-75.09 |
| Baterii acceptate | LFP1100_001_84_085 LFP1100_013_94_085 | LFP1100_007_81_080 LFP1100_003_95_083 LFP1100_011_78_082 | LFP1100_004_40_045 LFP1100_010_39_048 LFP1100_014_42_048 | LFP1100_006_37_056 LFP1100_008_40_058 LFP1100_016_38_058 | LFP1100_005_92_072 LFP1100_015_92_072 LFP1100_002_80_075 |

| | | | | | |
|---|--|--|------------------------|--|------------------------|
| | | LFP1100_017 _78_080 | LFP1100_020 _40_045 | LFP1100_018 _43_056 | LFP1100_019 _78_074 |
| Interval SOH [%] | 86 | 86-88 | 95 | 92 | 88 |
| Bateria cea mai aproapia tă de medie | LFP1100_001 _84_085 LFP1100_013 _94_085 | LFP1100_007 _81_080 LFP1100_017 _78_080 | LFP1100_014 _42_048 | LFP1100_006 _37_056 LFP1100_018 _43_056 | LFP1100_005 _92_072 |

Dependența dintre SOC și OCV este independentă de SOH, iar dependența dintre SOH și R_{in} este independentă de SOC, prin urmare este nevoie ca una din variabile să fie cunoscută. Astfel, se determină SOC și R_{in} conform procedurii prezentate anterior, și pe baza stării de încărcare se estimează rezistența internă la SOC actual și SOC 100%, iar diferența dintre cele două se adaugă la rezistența internă măsurată. Noua rezistență internă care corespunde la SOC 100% și SOH actual se compară cu rezistența internă de la SOC și SOH 100%. Dacă în urma comparației rezistența internă este mai mare decât cea de la SOH 100% atunci metoda este validată și într-adevăr bateria studiată are SOH diferit de 100%. Pentru modelarea dependenței dintre rezistența internă și starea de încărcare s-a realizat o regresie liniară cu polinom de ordinul 3 care aproximează tendința atât pe încărcare, cât și pe descărcare, Figura VII-3.

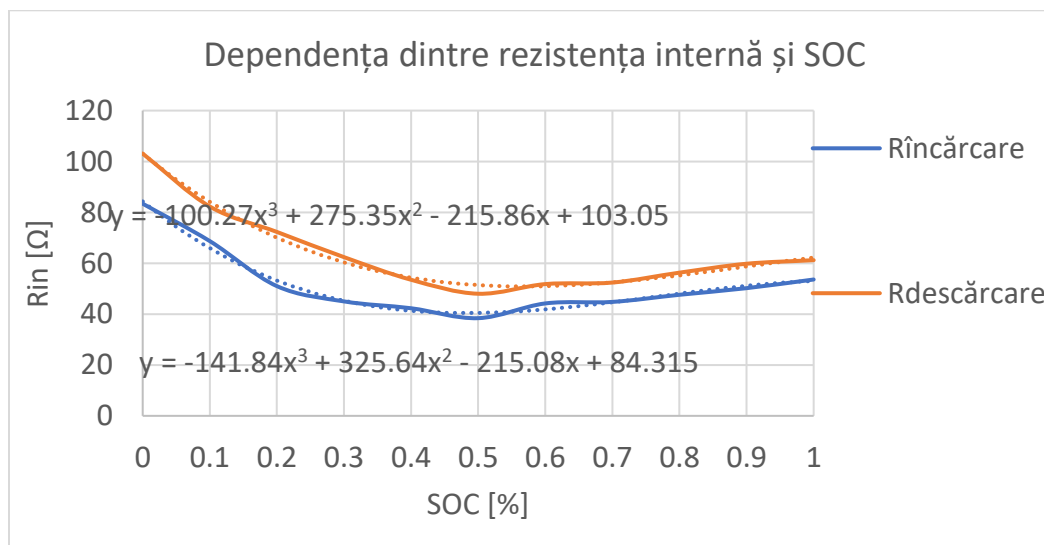


Figura. VII-3. Modelul realizat pentru estimarea rezistenței interne.

Ecuatiile caracteristice pentru modelul rezistenței interne la încărcare, respectiv descărcare, sunt prezentate în ecuațiile (11) și (12):

$$R_{descărcare} = -100.27 \cdot SOC^3 + 275.35 \cdot SOC^2 - 215.86 \cdot SOC + 103.05 \quad (11)$$

$$R_{încărcare} = -141.84 \cdot SOC^3 + 325.64 \cdot SOC^2 - 215.08 \cdot SOC + 84.315 \quad (12)$$

Prin aplicarea celor două ecuații pentru primul grup de baterii LFP1100_001_84_085 și LFP1100_013_94_085 obținem:

$$R_{descărcare} = -100.27 \cdot 0.94^3 + 275.35 \cdot 0.94^2 - 215.86 \cdot 0.94 + 103.05 = 56.58 \text{ m}\Omega \quad (13)$$

$$R_{încărcare} = -141.84 \cdot 0.84^3 + 325.64 \cdot 0.84^2 - 215.08 \cdot 0.84 + 84.315 = 52.06 \text{ m}\Omega \quad (14)$$

Pentru SOC 100% rezistențele interne vor fi:

$$R_{descărcare} = -100.27 \cdot 1^3 + 275.35 \cdot 0.1^2 - 215.86 \cdot 1 + 103.05 = 62.27 \text{ m}\Omega \quad (15)$$

$$R_{încărcare} = -141.84 \cdot 1^3 + 325.64 \cdot 1^2 - 215.08 \cdot 1 + 84.315 = 53.03 \text{ m}\Omega \quad (16)$$

Diferența dintre rezistențe devine:

$$\Delta R_{descărcare} = 62.27 \text{ m}\Omega - 56.58 \text{ m}\Omega = 5.69 \text{ m}\Omega \quad (17)$$

$$\Delta R_{încărcare} = 53.03 \text{ m}\Omega - 52.06 \text{ m}\Omega = 0.97 \text{ m}\Omega \quad (18)$$

În continuare această diferență se adaugă la valorile măsurate și se compară cu valorile estimate la SOC și SOH 100%:

$$R_{LFP1100_001_84_085} = 5.69 \text{ m}\Omega + 85.79 \text{ m}\Omega = 91.48 \text{ m}\Omega > 62.27 \text{ m}\Omega \quad (19)$$

$$R_{LFP1100_013_94_085} = 0.97 \text{ m}\Omega + 85.56 \text{ m}\Omega = 86.53 \text{ m}\Omega > 53.03 \text{ m}\Omega \quad (20)$$

Etapa de validare s-a axat pe două direcții: validarea sistemului și validarea metodei de sortare. În vederea validării sistemului s-au realizat inițial teste pentru verificarea modurilor de funcționare în cele patru cazuri posibile cu ajutorul echipamentelor de laborator, iar apoi a fost utilizat în scenarii reale de funcționare pentru determinarea datelor experimentale. În vederea validării metodei de sortare s-au analizat zece baterii noi de LiFePO₄. Astfel, s-a determinat capacitatea efectivă a bateriilor cu ajutorul procedurii prezentate în manualul USABC în vederea calculării SOH, iar apoi bateriile au fost împărțite pe patru subploturi și îmbătrânite accelerat prin aplicarea profilului Random Walking până s-au obținut valori apropiate de SOH 86%, 88%, 92%

și 95%. În continuare, s-au măsurat rezistențele interne ale bateriilor prin aplicarea unui impuls de curent de încărcare/descărcare de 18 secunde, iar pentru verificarea datelor obținute s-a realizat un al doilea set de măsurători. După care, s-a aplicat metoda de grupare pe cele două seturi de date pentru care s-au obținut cinci grupuri de baterii cu diferite stări de încărcare. Pentru verificarea rezultatelor obținute s-a realizat un model al dependenței dintre SOH și R_{in} pentru o baterie cu starea de sănătate de 100% care a fost utilizat pentru compararea valorilor măsurate. Rezultatele finale indică identificarea corectă a grupurilor de baterii, cu toate că în trei grupuri s-au regăsit baterii cu SOH 86% și 88%. Acest rezultat se încadrează în eroarea sugerată în literatură și manualul USABC de 2%.

VII.1 Contribuții personale

Având în vedere cele discutate anterior, pot afirma că în această teză de doctorat contribuțiile personale s-au materializat în trei direcții esențiale:

- conceptuale: studierea și analiza principalelor metode de sortare a bateriilor retrase din industria auto, precum și a structurilor de conversie DC-DC bidirecționale pentru realizarea sistemelor de sortare;
- experimentale: realizarea unui sistem propriu de sortare a bateriilor capabil să evalueze rapid o gamă largă de tehnologii de baterii;
- tehnologice: extinderea metodei clasice de sortare a bateriilor retrase din uz prin dezvoltarea unei noi metodologii de grupare a bateriilor; dezvoltarea unui model pentru determinarea OCV și a dependenței SOC-OCV.

Astfel, au fost urmărite și realizate următoarele obiective, care sunt totodată și contribuțiile originale în domeniu:

1. Elaborarea unui studiu amplu, pe baza parcurgerii unui număr important de referințe bibliografice, privind metodele actuale de sortare a bateriilor retrase din industria auto. Acest studiu a fost realizat în contextul dezvoltării unei noi metodologii de sortare care să abordeze strategii rapide de evaluare a stării de sănătate a bateriilor și care facilitează aplicarea pe scară largă.
2. Elaborarea unui studiu bibliografic extins privind structurile de conversie DC-DC bidirecționale în vederea stabilirii topologiei optime pentru realizarea sistemului de sortare care să permită testarea bateriilor de tip multi-tehnologie.
3. Dezvoltarea unei noi metodologii de sortare a bateriilor în vederea determinării stării de sănătate. Noua metodă cuprinde o etapă intermediară de presortare prin care bateriile sunt grupate în funcție de rezistența internă și o metodă de prelucrare a datelor obținute folosind tehnici statistice prin care o singură baterie este evaluată și care caracterizează între grupul.
4. Elaborarea cadrului metodologic pentru sortarea bateriilor în funcție de rezistența internă.
5. Dezvoltarea unei noi metode pentru determinarea OCV care utilizează un observator online de identificare a punctului de inflexiune de pe curba tensiunii.

6. Dezvoltarea unui model care aproximează dependența dintre starea de încărcare (SOC) a unei baterii și tensiunea de circuit deschis (OCV).
7. Proiectarea și alegerea componentelor circuitului de forță.
8. Studiul și simularea sistemului în vederea analizei comportării circuitelor digitale și analogice în programul specializat LTspice.
9. Studiul și simularea funcționării sistemului în programul Matlab/Simulink.
10. Adaptarea și îmbunătățirea modelului analitic Sheperd pentru blocul funcțional din Matlab/Simulink cu date experimentale.
11. Proiectarea și realizarea plăcii de circuit imprimat (PCB) și a modelului 3D în programul Autodesk Fusion 360.
12. Proiectarea și dezvoltarea sistemului de comandă în vederea implementării tehnicii de comandă a convertorului de putere și a metodei de sortare.
13. Implementarea și verificarea algoritmului de sortare în platforma Wokwi.
14. Consolidarea rezultatelor obținute prin testarea și validarea sistemului de sortare.
15. Elaborarea metodologiei în vederea extinderii soluției pentru testarea a 2N baterii.

VII.2 Direcții de dezvoltare ulterioare

Pentru a menține sistemul de sortare a bateriilor la cele mai înalte standarde tehnologice și pentru a-i extinde capacitățile în viitor, sunt propuse următoarele direcții de dezvoltare ulterioare:

1. Extinderea domeniului de tensiune:

Adaptarea sistemului pentru a suporta un domeniu mai larg de tensiuni va permite testarea și evaluarea noilor tehnologii de baterii care vor apărea pe piață. Aceasta include bateriile cu chimii inovatoare, cum ar fi solid-state, litu-sulf, și bateriile pe bază de metal-oxigen. Extinderea domeniului de tensiune va asigura compatibilitatea sistemului cu o gamă diversificată de baterii, facilitând astfel cercetarea și dezvoltarea de noi tehnologii energetice.

2. Îmbunătățirea metodei de sortare cu algoritmi pe bază de inteligență artificială:

Integrarea algoritmilor avansați de IA pentru analiza și predicția stării de sănătate a bateriilor poate îmbunătăți considerabil precizia și eficiența metodei de sortare propusă. Dezvoltarea unui model de auto-învățare care să poată adapta și îmbunătăți continuu algoritmi pe baza datelor colectate în timp real va permite sistemului să învețe din utilizările anterioare și să ajusteze metodele de evaluare a stării de sănătate.

3. Extinderea sistemului pentru 2N baterii:

În Figura VII-4 se prezintă o soluție pentru extinderea sistemului propus. Astfel, se pot testa simultan 2N baterii de tehnologii identice sau diferite, timpul de testare fiind redus la jumătate, iar la finalul procedurii de presortare se obțin 2N rezistențe interne. Sistemul poate fi extins pentru testarea a 2N baterii, B11-B21, B12-B22 ... B1N-B2N, prin montarea în paralel a N module de forță care conțin comutatoare de putere PS11-PS21-PS31-PS41, PS12-PS22-PS32-PS42 ... PS1N-PS2N-PS3N-PS4N, condensatoare de filtrare C11-C21, C12-C22 ... C1N-C2N, un element de stocare a energiei magnetice L1, L2 ... LN și senzori de curent și tensiune care

furnizează informațiile I_{11} - U_{11} - I_{21} - U_{21} , I_{12} - U_{12} - I_{22} - U_{22} ... I_{1N} - U_{1N} - I_{2N} - U_{2N} . Comanda celor N module de forță este realizată de același bloc de comandă și control.

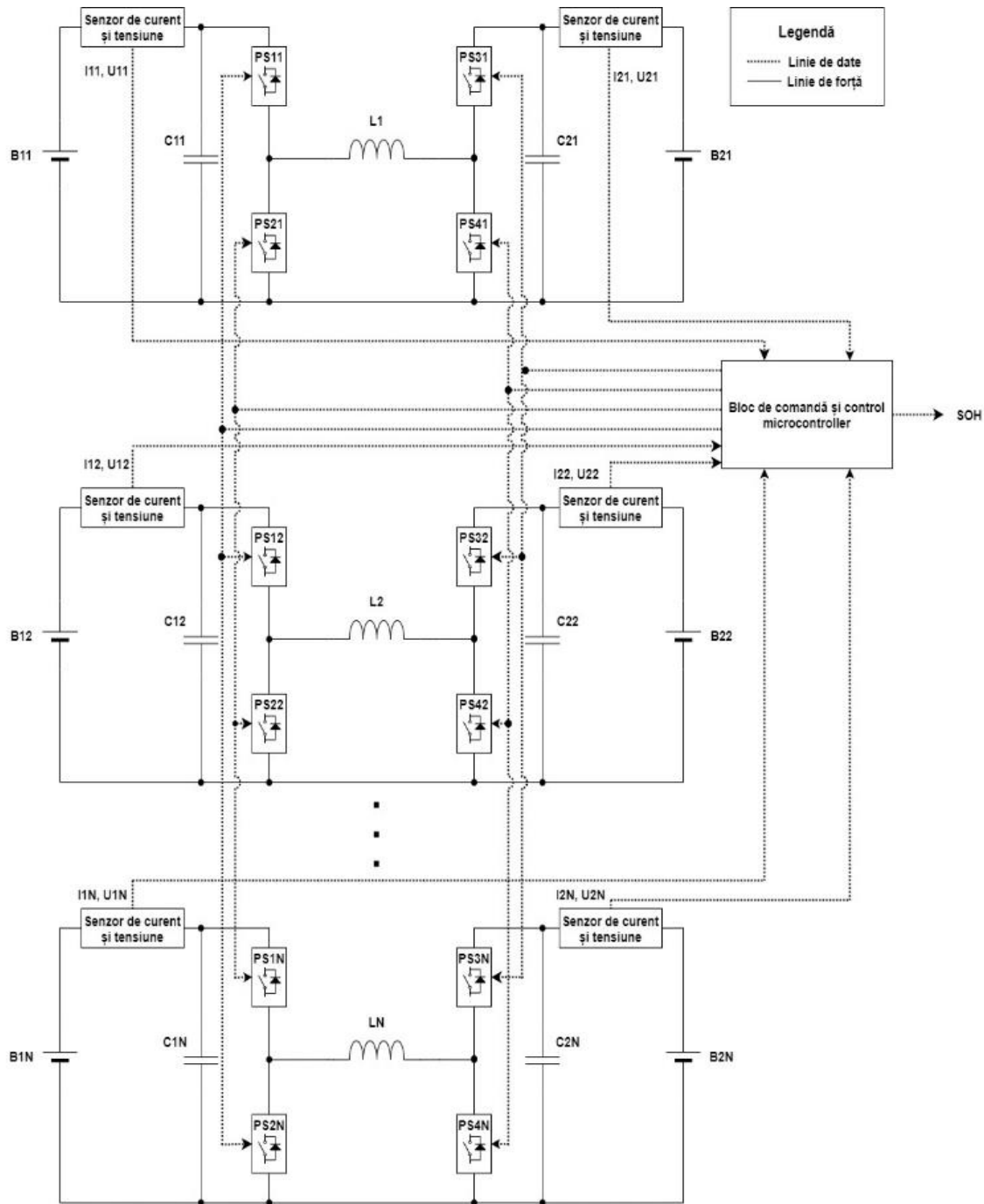


Figura. VII-4. Extinderea sistemului pentru $2N$ baterii.

Prin implementarea acestor direcții de dezvoltare, sistemul și metoda propuse vor putea să răspundă cerințelor viitoare ale pieței, să sprijine inovația tehnologică și să asigure o performanță optimă și durabilă a bateriilor.

BIBLIOGRAFIE

- [1] J. Li, S. He, Q. Yang, Z. Wei, Y. Li, and H. He, “A Comprehensive Review of Second Life Batteries Toward Sustainable Mechanisms: Potential, Challenges, and Future Prospects,” *IEEE Trans. Transp. Electrification*, vol. 9, no. 4, pp. 4824–4845, Dec. 2023, doi: 10.1109/TTE.2022.3220411.
- [2] Q. Dong, S. Liang, J. Li, H. C. Kim, W. Shen, and T. J. Wallington, “Cost, energy, and carbon footprint benefits of second-life electric vehicle battery use,” *iScience*, vol. 26, no. 7, p. 107195, Jul. 2023, doi: 10.1016/j.isci.2023.107195.
- [3] M. S. H. Lipu *et al.*, “A review of state of health and remaining useful life estimation methods for lithium-ion battery in electric vehicles: Challenges and recommendations,” *J. Clean. Prod.*, vol. 205, pp. 115–133, Dec. 2018, doi: 10.1016/j.jclepro.2018.09.065.
- [4] J. Sindha, J. Thakur, and M. Khalid, “The economic value of hybrid battery swapping stations with second life of batteries,” *Clean. Energy Syst.*, vol. 5, p. 100066, Aug. 2023, doi: 10.1016/j.cles.2023.100066.
- [5] Y. Wei and D. Wu, “State of health and remaining useful life prediction of lithium-ion batteries with conditional graph convolutional network,” *Expert Syst. Appl.*, vol. 238, p. 122041, Mar. 2024, doi: 10.1016/j.eswa.2023.122041.
- [6] Office for Product Safety & Standards, “A Study on the Safety of Second-life Batteries in Battery Energy Storage Systems,” Jan. 2023.
- [7] C. A. Rufino Júnior *et al.*, “Reviewing Regulations and Standards for Second-Life Batteries,” *Engineering*, preprint, Jun. 2023. doi: 10.20944/preprints202306.0711.v1.
- [8] Y. Zhao *et al.*, “A Review on Battery Market Trends, Second-Life Reuse, and Recycling,” *Sustain. Chem.*, vol. 2, no. 1, pp. 167–205, Mar. 2021, doi: 10.3390/suschem2010011.
- [9] A. A. Kebede *et al.*, “Optimal sizing and lifetime investigation of second life lithium-ion battery for grid-scale stationary application,” *J. Energy Storage*, vol. 72, p. 108541, Nov. 2023, doi: 10.1016/j.est.2023.108541.
- [10] A. Barré, B. Deguilhem, S. Grolleau, M. Gérard, F. Suard, and D. Riu, “A review on lithium-ion battery ageing mechanisms and estimations for automotive applications,” *J. Power Sources*, vol. 241, pp. 680–689, Nov. 2013, doi: 10.1016/j.jpowsour.2013.05.040.
- [11] M. Thomas, L. A.-W. Ellingsen, and C. R. Hung, “Research for TRAN Committee - Battery-powered electric vehicles: market development and lifecycle emissions,” 2018, doi: 10.2861/038794.
- [12] K. Chirumalla, I. Kulkov, V. Parida, E. Dahlquist, G. Johansson, and I. Stefan, “Enabling battery circularity: Unlocking circular business model archetypes and collaboration forms in the electric vehicle battery ecosystem,” *Technol. Forecast. Soc. Change*, vol. 199, p. 123044, Feb. 2024, doi: 10.1016/j.techfore.2023.123044.
- [13] L. C. Casals, B. Amante García, and C. Canal, “Second life batteries lifespan: Rest of useful life and environmental analysis,” *J. Environ. Manage.*, vol. 232, pp. 354–363, Feb. 2019, doi: 10.1016/j.jenvman.2018.11.046.

- [14] H. Rallo, G. Benveniste, I. Gestoso, and B. Amante, "Economic analysis of the disassembling activities to the reuse of electric vehicles Li-ion batteries," *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 159, p. 104785, Aug. 2020, doi: 10.1016/j.resconrec.2020.104785.
- [15] J. Zhu *et al.*, "End-of-life or second-life options for retired electric vehicle batteries," *Cell Rep. Phys. Sci.*, vol. 2, no. 8, p. 100537, Aug. 2021, doi: 10.1016/j.xcrp.2021.100537.
- [16] E. Martinez-Laserna *et al.*, "Battery second life: Hype, hope or reality? A critical review of the state of the art," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 93, pp. 701–718, Oct. 2018, doi: 10.1016/j.rser.2018.04.035.
- [17] E. Hossain, D. Murtaugh, J. Mody, H. M. R. Faruque, Md. S. Haque Sunny, and N. Mohammad, "A Comprehensive Review on Second-Life Batteries: Current State, Manufacturing Considerations, Applications, Impacts, Barriers & Potential Solutions, Business Strategies, and Policies," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 73215–73252, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2917859.
- [18] J. Urquizo and P. Singh, "A review of health estimation methods for Lithium-ion batteries in Electric Vehicles and their relevance for Battery Energy Storage Systems," *J. Energy Storage*, vol. 73, p. 109194, Dec. 2023, doi: 10.1016/j.est.2023.109194.
- [19] R. R. Kumar, C. Bharatiraja, K. Udhayakumar, S. Devakirubakaran, K. S. Sekar, and L. Mihet-Popa, "Advances in Batteries, Battery Modeling, Battery Management System, Battery Thermal Management, SOC, SOH, and Charge/Discharge Characteristics in EV Applications," *IEEE Access*, vol. 11, pp. 105761–105809, 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3318121.
- [20] R. Xiong, L. Li, and J. Tian, "Towards a smarter battery management system: A critical review on battery state of health monitoring methods," *J. Power Sources*, vol. 405, pp. 18–29, Nov. 2018, doi: 10.1016/j.jpowsour.2018.10.019.
- [21] B. Yang *et al.*, "Critical summary and perspectives on state-of-health of lithium-ion battery," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 190, p. 114077, Feb. 2024, doi: 10.1016/j.rser.2023.114077.
- [22] L. Canals Casals, B. Amante García, and L. V. Cremades, "Electric vehicle battery reuse: Preparing for a second life," *J. Ind. Eng. Manag.*, vol. 10, no. 2, p. 266, May 2017, doi: 10.3926/jiem.2009.
- [23] Xiaoyu Li, Tiansi Wang, Lei Pei, Chunbo Zhu, and Bingliang Xu, "A comparative study of sorting methods for Lithium-ion batteries," in *2014 IEEE Conference and Expo Transportation Electrification Asia-Pacific (ITEC Asia-Pacific)*, Beijing, China: IEEE, Aug. 2014, pp. 1–6. doi: 10.1109/ITEC-AP.2014.6940724.
- [24] L. Ungurean, G. Cârstoiu, M. V. Micea, and V. Groza, "Battery state of health estimation: a structured review of models, methods and commercial devices: Battery State of Health Estimation: a Structured Review," *Int. J. Energy Res.*, vol. 41, no. 2, pp. 151–181, Feb. 2017, doi: 10.1002/er.3598.
- [25] E. Kona, "Stationary VRLA battery health estimation by resistance measurement - comparison of dc and ac test methods," in *2016 IEEE International Conference on Power*

- Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES)*, Trivandrum, India: IEEE, Dec. 2016, pp. 1–5. doi: 10.1109/PEDES.2016.7914561.
- [26] Y. Li *et al.*, “Data-driven health estimation and lifetime prediction of lithium-ion batteries: A review,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 113, p. 109254, Oct. 2019, doi: 10.1016/j.rser.2019.109254.
- [27] B.-A. Enache and E. Diaconescu, “Estimating a battery state of charge using neural networks,” in *2014 International Symposium on Fundamentals of Electrical Engineering (ISFEE)*, Bucharest, Romania: IEEE, Nov. 2014, pp. 1–6. doi: 10.1109/ISFEE.2014.7050636.
- [28] M. Berecibar, I. Gandiaga, I. Villarreal, N. Omar, J. Van Mierlo, and P. Van Den Bossche, “Critical review of state of health estimation methods of Li-ion batteries for real applications,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 56, pp. 572–587, Apr. 2016, doi: 10.1016/j.rser.2015.11.042.
- [29] M. Shahjalal *et al.*, “A review on second-life of Li-ion batteries: prospects, challenges, and issues,” *Energy*, vol. 241, p. 122881, Feb. 2022, doi: 10.1016/j.energy.2021.122881.
- [30] A. Farmann, W. Waag, A. Marongiu, and D. U. Sauer, “Critical review of on-board capacity estimation techniques for lithium-ion batteries in electric and hybrid electric vehicles,” *J. Power Sources*, vol. 281, pp. 114–130, May 2015, doi: 10.1016/j.jpowsour.2015.01.129.
- [31] B.-A. Enache, G.-C. Seritan, and C. Cepisca, “Comparative study of screening methods for second-life LiFePO₄ batteries,” *Rev Roum Sci Techn–Électrotechn Énerg*, vol. 65, no. 1–2, pp. 71–74, 2020.
- [32] S. Yang, C. Zhang, J. Jiang, W. Zhang, L. Zhang, and Y. Wang, “Review on state-of-health of lithium-ion batteries: Characterizations, estimations and applications,” *J. Clean. Prod.*, vol. 314, p. 128015, Sep. 2021, doi: 10.1016/j.jclepro.2021.128015.
- [33] Y. Guo, K. Huang, and X. Hu, “A state-of-health estimation method of lithium-ion batteries based on multi-feature extracted from constant current charging curve,” *J. Energy Storage*, vol. 36, p. 102372, Apr. 2021, doi: 10.1016/j.est.2021.102372.
- [34] J. He, S. Meng, X. Li, and F. Yan, “Partial Charging-Based Health Feature Extraction and State of Health Estimation of Lithium-Ion Batteries,” *IEEE J. Emerg. Sel. Top. Power Electron.*, vol. 11, no. 1, pp. 166–174, Feb. 2023, doi: 10.1109/JESTPE.2022.3143831.
- [35] C. Lin, J. Xu, M. Shi, and X. Mei, “Constant current charging time based fast state-of-health estimation for lithium-ion batteries,” *Energy*, vol. 247, p. 123556, May 2022, doi: 10.1016/j.energy.2022.123556.
- [36] S. K. Pradhan and B. Chakraborty, “Battery management strategies: An essential review for battery state of health monitoring techniques,” *J. Energy Storage*, vol. 51, p. 104427, Jul. 2022, doi: 10.1016/j.est.2022.104427.
- [37] M. M. Camboim *et al.*, “State of health estimation of second-life batteries through electrochemical impedance spectroscopy and dimensionality reduction,” *J. Energy Storage*, vol. 78, p. 110063, Feb. 2024, doi: 10.1016/j.est.2023.110063.

- [38] S. Zhang, X. Guo, X. Dou, and X. Zhang, "A rapid online calculation method for state of health of lithium-ion battery based on coulomb counting method and differential voltage analysis," *J. Power Sources*, vol. 479, p. 228740, Dec. 2020, doi: 10.1016/j.jpowsour.2020.228740.
- [39] R. Zhou, R. Zhu, C.-G. Huang, and W. Peng, "State of health estimation for fast-charging lithium-ion battery based on incremental capacity analysis," *J. Energy Storage*, vol. 51, p. 104560, Jul. 2022, doi: 10.1016/j.est.2022.104560.
- [40] X. Feng *et al.*, "Online State-of-Health Estimation for Li-Ion Battery Using Partial Charging Segment Based on Support Vector Machine," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 68, no. 9, pp. 8583–8592, Sep. 2019, doi: 10.1109/TVT.2019.2927120.
- [41] T. Sun, R. Wu, Y. Cui, and Y. Zheng, "Sequent extended Kalman filter capacity estimation method for lithium-ion batteries based on discrete battery aging model and support vector machine," *J. Energy Storage*, vol. 39, p. 102594, Jul. 2021, doi: 10.1016/j.est.2021.102594.
- [42] J. Jia, J. Liang, Y. Shi, J. Wen, X. Pang, and J. Zeng, "SOH and RUL Prediction of Lithium-Ion Batteries Based on Gaussian Process Regression with Indirect Health Indicators," *Energies*, vol. 13, no. 2, p. 375, Jan. 2020, doi: 10.3390/en13020375.
- [43] S. B. Sarmah *et al.*, "A Review of State of Health Estimation of Energy Storage Systems: Challenges and Possible Solutions for Futuristic Applications of Li-Ion Battery Packs in Electric Vehicles," *J. Electrochem. Energy Convers. Storage*, vol. 16, no. 4, p. 040801, Nov. 2019, doi: 10.1115/1.4042987.
- [44] J. Tian, R. Xiong, and W. Shen, "A review on state of health estimation for lithium ion batteries in photovoltaic systems," *eTransportation*, vol. 2, p. 100028, Nov. 2019, doi: 10.1016/j.etrans.2019.100028.
- [45] Z. Wang, X. Zhao, L. Fu, D. Zhen, F. Gu, and A. D. Ball, "A review on rapid state of health estimation of lithium-ion batteries in electric vehicles," *Sustain. Energy Technol. Assess.*, vol. 60, p. 103457, Dec. 2023, doi: 10.1016/j.seta.2023.103457.
- [46] F. Von Bülow, J. Mentz, and T. Meisen, "State of health forecasting of Lithium-ion batteries applicable in real-world operational conditions," *J. Energy Storage*, vol. 44, p. 103439, Dec. 2021, doi: 10.1016/j.est.2021.103439.
- [47] D. Pan, H. Li, and Y. Song, "A Comparative Study of Particle Filters and its Variants in Lithium-ion Battery SOH Estimation," in *2020 International Conference on Sensing, Measurement & Data Analytics in the era of Artificial Intelligence (ICSMD)*, Xi'an, China: IEEE, Oct. 2020, pp. 198–203. doi: 10.1109/ICSMD50554.2020.9261654.
- [48] F. Zhu and J. Fu, "A Novel State-of-Health Estimation for Lithium-Ion Battery via Unscented Kalman Filter and Improved Unscented Particle Filter," *IEEE Sens. J.*, vol. 21, no. 22, pp. 25449–25456, Nov. 2021, doi: 10.1109/JSEN.2021.3102990.
- [49] F. von Bülow and T. Meisen, "A review on methods for state of health forecasting of lithium-ion batteries applicable in real-world operational conditions," *J. Energy Storage*, vol. 57, p. 105978, Jan. 2023, doi: 10.1016/j.est.2022.105978.

- [50] S. Li, Z. Fu, J. Zhu, and Y. Yuan, "Estimation of State-of-Health for Lithium-Ion Battery Based on Increment Capacity Analysis Method and Long Short-Term Memory Neural Network," in *2023 IEEE/IAS Industrial and Commercial Power System Asia (I&CPS Asia)*, Chongqing, China: IEEE, Jul. 2023, pp. 1818–1823. doi: 10.1109/ICPSAsia58343.2023.10294949.
- [51] M. Şahin, "A comprehensive analysis of weighting and multicriteria methods in the context of sustainable energy," *Int. J. Environ. Sci. Technol.*, vol. 18, no. 6, pp. 1591–1616, Jun. 2021, doi: 10.1007/s13762-020-02922-7.
- [52] *** Jon P. Christopherson, "USABC Battery Test Manual For Electric Vehicles Rev. 3." Jun. 2015. [Online]. Available: chrome-extension://efaidnbmninnibpcajpcglclefindmkaj/https://inldigitallibrary.inl.gov/sites/sti/sti/6492291.pdf
- [53] M. Arrinda *et al.*, "Application Dependent End-of-Life Threshold Definition Methodology for Batteries in Electric Vehicles," *Batteries*, vol. 7, no. 1, p. 12, Feb. 2021, doi: 10.3390/batteries7010012.
- [54] Z. Yu, B. Lv, R. Huai, L. Chang, Z. Sun, and H. Li, "Research on rapid extraction of internal resistance of lithium battery based on short-time transient response," *J. Energy Storage*, vol. 77, p. 109985, Jan. 2024, doi: 10.1016/j.est.2023.109985.
- [55] E. Braco, I. San Martín, P. Sanchis, and A. Ursúa, "Fast capacity and internal resistance estimation method for second-life batteries from electric vehicles," *Appl. Energy*, vol. 329, p. 120235, Jan. 2023, doi: 10.1016/j.apenergy.2022.120235.
- [56] Y. Wang, S.-Y. Kim, Y. Chen, H. Zhang, and S.-J. Park, "An SMPS-Based Lithium-Ion Battery Test System for Internal Resistance Measurement," *IEEE Trans. Transp. Electrification*, vol. 9, no. 1, pp. 934–944, Mar. 2023, doi: 10.1109/TTE.2022.3178981.
- [57] A. Tang, P. Gong, Y. Huang, X. Wu, and Q. Yu, "Research on pulse charging current of lithium-ion batteries for electric vehicles in low-temperature environment," *Energy Rep.*, vol. 9, pp. 1447–1457, Sep. 2023, doi: 10.1016/j.egy.2023.04.226.
- [58] L. Wang, X. Zhao, Z. Deng, and L. Yang, "Application of electrochemical impedance spectroscopy in battery management system: State of charge estimation for aging batteries," *J. Energy Storage*, vol. 57, p. 106275, Jan. 2023, doi: 10.1016/j.est.2022.106275.
- [59] S. Barcellona, S. Colnago, and L. Piegari, "Analysis of the lithium-ion batteries resistance hysteresis phenomenon," in *2022 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM)*, Sorrento, Italy: IEEE, Jun. 2022, pp. 46–51. doi: 10.1109/SPEEDAM53979.2022.9842069.
- [60] M. A. Hoque *et al.*, "Data driven analysis of lithium-ion battery internal resistance towards reliable state of health prediction," *J. Power Sources*, vol. 513, p. 230519, Nov. 2021, doi: 10.1016/j.jpowsour.2021.230519.
- [61] A. Blidberg, "Correlation between different impedance measurement methods for battery cells," *KTH Chem. Sci. Eng.*, 2012.

- [62] G. Piłatowicz, A. Marongiu, J. Drillkens, P. Sinhuber, and D. U. Sauer, “A critical overview of definitions and determination techniques of the internal resistance using lithium-ion, lead-acid, nickel metal-hydride batteries and electrochemical double-layer capacitors as examples,” *J. Power Sources*, vol. 296, pp. 365–376, Nov. 2015, doi: 10.1016/j.jpowsour.2015.07.073.
- [63] L. Pei, T. Wang, R. Lu, and C. Zhu, “Development of a voltage relaxation model for rapid open-circuit voltage prediction in lithium-ion batteries,” *J. Power Sources*, vol. 253, pp. 412–418, May 2014, doi: 10.1016/j.jpowsour.2013.12.083.
- [64] M.-Y. Zhou, J.-B. Zhang, C.-J. Ko, and K.-C. Chen, “Precise prediction of open circuit voltage of lithium ion batteries in a short time period,” *J. Power Sources*, vol. 553, p. 232295, Jan. 2023, doi: 10.1016/j.jpowsour.2022.232295.
- [65] Y. Muratoglu and A. Alkaya, “Unscented Kalman Filter based State of Charge Estimation for the Equalization of Lithium-ion Batteries on Electrical Vehicles,” *Eng. Technol. Appl. Sci. Res.*, vol. 9, no. 6, pp. 4876–4882, Dec. 2019, doi: 10.48084/etasr.3111.
- [66] D. Theuerkauf and L. Swan, “Characteristics of Open Circuit Voltage Relaxation in Lithium-Ion Batteries for the Purpose of State of Charge and State of Health Analysis,” *Batteries*, vol. 8, no. 8, p. 77, Jul. 2022, doi: 10.3390/batteries8080077.
- [67] T.-I. Voicilă, G.-C. Seritan, B.-A. Enache, R. Porumb, and M. Stănculescu, “First Steps Towards the Design of a multi-Chemistry, multi-Battery State of Health Screening System,” in *2023 13th International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering (ATEE)*, IEEE, 2023, pp. 1–6.
- [68] PhD Student., Doctoral School of Electrical Engineering, University POLITEHNICA of Bucharest, S. Gkanatsios, I. Vilciu, Lecturer, Department of Measurements, Electrical Apparatus and Static Converters, University POLITEHNICA of Bucharest, T.-I. Voicila, and Professor Assistant, Department of Measurements, Electrical Apparatus and Static Converters, University POLITEHNICA of Bucharest, “Evaluating the state of health of lead-acid battery used in UPS,” *EMERG - Energy Environ. Effic. Resour. Glob.*, vol. 9, no. 3, pp. 50–61, 2023, doi: 10.37410/EMERG.2023.3.03.
- [69] D. Zhan, “White Paper - Design Considerations for a Bidirectional DC/DC Converter,” *Ind. Analog Power Group Renesas Electron. Corp*, Sep. 2018, Accessed: Oct. 13, 2023. [Online]. Available: <https://www.renesas.com/us/en/document/whp/design-considerations-bidirectional-dcdc-converter>
- [70] Ping-Ching Huang, Wei-Quan Wu, Hsin-Hsin Ho, and Ke-Horng Chen, “Hybrid Buck–Boost Feedforward and Reduced Average Inductor Current Techniques in Fast Line Transient and High-Efficiency Buck–Boost Converter,” *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 25, no. 3, pp. 719–730, Mar. 2010, doi: 10.1109/TPEL.2009.2031803.
- [71] Z. Zhou, H. Li, and X. Wu, “A Constant Frequency ZVS Control System for the Four-Switch Buck–Boost DC–DC Converter With Reduced Inductor Current,” *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 34, no. 7, pp. 5996–6003, Jul. 2019, doi: 10.1109/TPEL.2018.2884950.

- [72] TI Designs: SLVA535B, “Basic Calculations of a 4 Switch Buck-Boost Power Stage.” Accessed: May 17, 2023. [Online]. Available: https://www.ti.com/lit/an/slva535b/slva535b.pdf?ts=1684332497303&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F
- [73] TI Designs: SLVA372D, “Basic Calculation of a Boost Converter’s Power Stage.” Accessed: May 17, 2023. [Online]. Available: https://www.ti.com/lit/an/slva372d/slva372d.pdf?ts=1684302905583&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F
- [74] TI Application Report: SLVA477B, “Basic Calculation of a Buck Converter’s Power Stage.” Accessed: May 17, 2023. [Online]. Available: https://www.ti.com/lit/an/slva477b/slva477b.pdf?ts=1684301546101&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F
- [75] *** Wurth Elektronik, “Datasheet WE-HCF Round Wire SMT High Current Inductor, 74437529203221.” Apr. 26, 2023. [Online]. Available: <chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.wurth-electronic.com/components/products/datasheet/74437529203221.pdf>
- [76] *** Wurth Elektronik, “Datasheet WCAP-PSHP Aluminum Polymer Capacitors, 875115655003.” Jun. 02, 2023. [Online]. Available: <chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.wurth-electronic.com/components/products/datasheet/875115655003.pdf>
- [77] ***, “Datasheet IRF530NSPbF.” [Online]. Available: <chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.infineon.com/dgdl/irf530nspbf.pdf?fileId=5546d462533600a4015355e38eb4199c>
- [78] *** Linear Technology Corp., “Datasheet High Voltage Synchronous N-Channel MOSFET Driver, LTC4444-5”, [Online]. Available: <chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/4449fa.pdf>
- [79] *** Kemet, “Datasheet Tantalum Surface Mount Capacitors, T499A224K035ATE18K.” Dec. 07, 2023. [Online]. Available: <chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://connect.kemet.com:7667/gateway/IntelliData-ComponentDocumentation/1.0/download/datasheet/T499A224K035ATE18K>
- [80] *** ROHM, “Datasheet Schottky Barrier Diode, RB075BGE40S.” Dec. 07, 2019. [Online]. Available: <https://www.rohm.com/datasheet?p=RB075BGE40S&dist=Digi-key&media=referral&source=digi-key.com&campaign=Digi-key>
- [81] N. Campagna *et al.*, “Battery models for battery powered applications: A comparative study,” *Energies*, vol. 13, no. 16, p. 4085, 2020.
- [82] T.-I. Voicila, G.-C. Seritan, B.-A. Enache, M. Stanculescu, and R.-F. Porumb, “Design and implementation of a multi-battery, multi-chemistry state of health screening system,” in *2023 10th International Conference on Modern Power Systems (MPS)*, Cluj-Napoca, Romania: IEEE, Jun. 2023, pp. 1–4. doi: 10.1109/MPS58874.2023.10187442.

- [83] C. H. Gandescu, S. Gkanatsios, C. Cepisca, I. Vilciu, and T.-I. Voicila, “Accurate Modelling of an Online Uninterrupted Power Supply”.
- [84] *** S. Espressif, “Esp32 datasheet,” *IotY Based Microcontroller*, 2017.
- [85] *** Adafruit Industries LLC, “Datasheet INA219 High Side DC Current Sensor Breakout - 26V +/- 3.2A Max, ID 904.” [Online]. Available: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://mm.digikey.com/Volume0/opasdata/d220001/medias/docus/1860/904_Web.pdf
- [86] *** Adafruit, “Datasheet Shield-LCD16x2.” [Online]. Available: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.tme.eu/Document/8a4fa5818a91f3c03fe1ef0e62962b73/SHIELD-LCD16x2.pdf
- [87] J. Yu, B. Mo, D. Tang, J. Yang, J. Wan, and J. Liu, “Indirect State-of-Health Estimation for Lithium-Ion Batteries under Randomized Use,” *Energies*, vol. 10, no. 12, p. 2012, Dec. 2017, doi: 10.3390/en10122012.
- [88] P. Venugopal and V. T., “State-of-Health Estimation of Li-ion Batteries in Electric Vehicle Using IndRNN under Variable Load Condition,” *Energies*, vol. 12, no. 22, p. 4338, Nov. 2019, doi: 10.3390/en12224338.