

## MAXIMIZAREA EFICIENȚEI DE GESTIONARE A BATERIILOR REÎNCĂRCABILE ÎN APLICAȚII CRITICE DE STOCARE DE ENERGIE

### Teză de doctorat – Rezumat

pentru obținerea titlului științific de doctor la

Universitatea Politehnică Timișoara

în domeniul de doctorat Calculatoare și tehnologia informației

**autor ing. Gabriel Nicolae Cârstoiu**

conducător științific Prof.univ.dr.habil.ing. Mihai V. Micea

luna noiembrie anul 2021

### Cuprins

1. Introducere .....	2
1.1. Domeniul și tema cercetării .....	2
1.2. Motivația și obiectivele cercetării.....	2
1.3. Structura tezei .....	3
2. Stadiul actual al cercetării .....	3
3. Metodă pentru minimizarea degradării bateriilor.....	5
3.1. Uniformizarea degradării la memoriile Flash.....	5
3.2. Analogia grup de acumulatori-memorie flash și principiile metodei BWL .....	5
3.3. Implementarea metodei BWL.....	6
4. Metodologia de cercetare .....	7
5. Analiza performanțelor metodei BWL.....	8
5.1. Variația parametrilor fizici .....	8
5.2. Variația parametrilor de calcul .....	9
5.3. Analiza performanțelor pe un set de date extern .....	9
6. Implementare practică BMS bazat pe metoda BWL.....	10
6.1. Nucleul BMS și programul demonstrativ .....	10
6.2. Platforme HW și SW pentru implementare .....	10
6.3. Analiză comparativă a rezultatelor obținute .....	10
7. Concluzii și perspective .....	11
8. Referințe bibliografice.....	12

# 1. Introducere

## 1.1. Domeniul și tema cercetării

Progresul tehnologic fără precedent de care se bucură omenirea în prezent nu ar fi fost posibil fără anumite componente esențiale – bateriile reîncărcabile. În prezent, tehnologia cea mai utilizată este cea a bateriilor reîncărcabile de tip Litiu-ion. O clasă relativ nouă de aplicații bazate pe baterii o reprezintă aplicațiile critice de stocare de energie (autovehiculele electrice, sistemele de stocare de energie de rezervă pentru centre de date, etc). Subiectul principal abordat de această teză este reducerea degradării bateriilor reîncărcabile de tip Li-Ion. Deși majoritatea sistemelor de management a bateriilor (BMS) din aplicațiile critice de stocare de energie implementează mecanisme de echilibrare a bateriilor, în practică se constată o degradare prematură a bateriilor componente. Topologia reconfigurabilă de conectare este o alternativă recentă, dar problema maximizării duratei de viață a acestor sisteme, concomitent cu reducerea costului total de utilizare este incomplet rezolvată. În această lucrare s-a pornit de la observația analogiei dintre memoriile flash și grupurile reconfigurabile de acumulatori (GRA) pentru a dezvolta o metodă bazată pe principiile și algoritmi de wear leveling, denumită BWL. Metoda a fost integrată într-un BMS proiectat de autor pentru GRA, iar pentru evaluarea sistemului s-a elaborat o metodologie cuprinzătoare. Prin analiza performanțelor BMS ce integrează metoda BWL comparativ cu implementări BMS convenționale, s-a demonstrat viabilitatea și superioritatea acesteia în toate scenariile considerate.

Bateriile reîncărcabile sunt sisteme electrochimice complexe, fiind componente esențiale pentru progresul tehnologic actual din ce în ce mai rapid. Sony a prezentat prima baterie reîncărcabilă Li-Ion în 1991, iar de atunci piața acestor baterii a cunoscut o dezvoltare extraordinară. În prezent, bateriile reîncărcabile bazate pe litiu sunt de departe cele mai utilizate, în detrimentul unor tehnologii mai vechi [1]. Un dezavantaj al bateriilor Li-Ion este că durata rămasă de utilizare (RUL) sau mărimea echivalentă - starea de degradare (State-of-Health – SoH) este direct dependentă de temperatură, de mărimea curentului de încărcare/descărcare, precum și de gradul de încărcare/descărcare (State-of-charge – SoC). De aceea, orice baterie Li-Ion dintr-un dispozitiv de larg consum conține în interior un circuit de protecție.

Aplicațiile industriale precum autovehiculele electrice, sisteme de stocare de energie de rezervă (UPS) pentru centre de date, sau sistemele de stocare conectate la rețeaua de distribuție de energie electrică sunt doar câteva exemple de aplicații ce utilizează tot mai mult baterii Li-Ion. Aceste aplicații necesită sisteme de management a bateriilor (BMS) cu cerințe mari de scalabilitate și fiabilitate. Cercetările recente în domeniu au condus la apariția grupului de acumulatori reconfigurabil, ce permite adaptarea dinamică la sarcină și creșterea fiabilității, prin posibilitatea decuplării și izolării bateriilor problematice. Totuși, gestionarea eficientă a grupurilor reconfigurabile de acumulatori utilizate în aplicațiile sus-menționate rămâne o problemă nerezolvată.

## 1.2. Motivația și obiectivele cercetării

Starea de degradare a bateriei (SOH) se definește uzual ca raportul dintre capacitatea curentă a bateriei și capacitatea nominală a bateriei noi, la rata de descărcare de 1C [2]. Deoarece durata de viață poate scădea accelerat dacă bateria este utilizată necorespunzător, se constată că problema gestionării cât mai eficiente a bateriilor reîncărcabile este de actualitate și numărul de articole publicate în acest domeniu este în creștere. În aplicațiile ce utilizează baterii reîncărcabile, componenta principală a costului de exploatare și principalul motiv al scoaterii din funcțiune este degradarea prematură a bateriilor. În literatură sunt descrise mai multe metode pentru reducerea degradării, dar unele sunt prea complexe pentru a fi implementate în sisteme embedded iar altele nu iau în considerare toate aspectele legate de cost sau fiabilitate. În domeniul relativ nou al GRA există un interes științific ridicat, dar puține articole prezintă o analiză completă a costurilor și beneficiilor unei implementări practice.

Obiectivul principal al cercetării ce stă la baza acestei lucrări este de a aduce contribuții la îmbunătățirea eficienței de gestionare a bateriilor reîncărcabile, în sisteme reconfigurabile de stocare de energie [3]. În acest sens, ideea inițială de la care s-a pornit este studierea posibilității de aplicare a metodelor de uniformizare a memoriilor flash (wear leveling) la domeniul bateriilor, bazat pe observația analogiei între degradarea celulelor de memorie flash și degradarea bateriilor Li-ion.

Al doilea obiectiv al cercetării doctorale este elaborarea unui sistem programabil de management a bateriilor reîncărcabile în vederea reducerii costului total de utilizare.

### 1.3. Structura tezei

Teza de doctorat este structurată astfel:

- Capitolul 2 efectuează o trecere în revistă a stadiului actual al cercetării pentru: tipurile de modele pentru estimarea și predicția SOH, soluții și circuite comerciale pentru estimarea SOH, grupuri reconfigurabile de acumulatori, sisteme BMS, clasificarea arhitecturilor BMS existente.
- În capitolul 3 se introduce metoda propusă de autor pentru minimizarea degradării bateriilor. Se prezintă stadiul actual în domeniul uniformizării degradării la memoriile Flash, se face o analiză comparativă între conceptele memoriilor Flash și cele ale grupurilor de acumulatori. Se descriu apoi principiile sistemului BWL propus și cele ale unui BMS bazat pe această metodă.
- În capitolul 4 se prezintă metodologia utilizată în cadrul cercetării întreprinse pentru prezenta lucrare.
- Capitolul 5 prezintă rezultatele obținute prin rularea scenariilor de simulare descrise în capitolul anterior dar și rezultatele aplicării metodei propuse asupra unui set de date disponibil public.
- În capitolul 6 se prezintă implementarea practică a unui BMS minimal, pe o serie de platforme hardware și software, atât de tip desktop PC cât și embedded.
- Capitolul 7 concludă lucrarea, descrie o sinteză a contribuțiilor principale prezentate în teză și relevă câteva idei pentru eventuale cercetări ulterioare.

## 2. Stadiul actual al cercetării

Sistemele de stocare de energie de mare capacitate pot fi întâlnite în aplicații industriale, comerciale sau casnice, care conțin un număr mare de baterii reîncărcabile, având astfel costuri mari de funcționare și de întreținere. Numărul mare de articole publicate în domeniul maximizării duratei de viață a bateriilor reîncărcabile demonstrează interesul comunității științifice pentru această problemă incomplet rezolvată. Determinarea precisă a stării de degradare a bateriilor în scopul estimării duratei de viață este foarte importantă din punct de vedere tehnic și economic.

Unul din cele mai utilizate modele de baterii este cel echivalent electric [4] sau Randles de ordinul  $n$ . O variantă derivată din acesta este modelul electrochimic, care este în general mai complex datorită aproximării proceselor electrochimice în fazele de relaxare, descărcare și încărcare [5]. Modelul matematic descrie comportamentul dinamic al bateriei pe baza unor relații empirice între parametri artificiali, fără o legătură directă cu fizica bateriei. În literatură mai există și modele bazate pe ciclul de viață, care monitorizează parametrii de funcționare ai bateriilor pe termen lung [6].

Odată cu dezvoltarea pieței dispozitivelor alimentate de la baterii, au apărut circuite și soluții integrate care facilitează managementul bateriilor [7]-[8]. Printre producătorii unor astfel de soluții putem aminti: Texas Instruments, Maxim Integrated, ST Microelectronics, Analog devices și HDM Systems. O caracteristică generală a soluțiilor comerciale este că metodele de estimare utilizate se bazează în general pe modele electrice relativ simple, iar majoritatea

producătorilor nu oferă detalii de implementare. Performanța acestor soluții este acceptabilă, fiind însă inferioară metodelor mai avansate din literatura de specialitate.

Modelarea degradării în condiții de utilizare arbitrare este abordată în modelul de baterie electric-matematic din [9], bazat pe fenomenul de propagare a crăpăturilor în structura electrozilor. Din datele experimentale prezentate în articol, se poate concluziona că modelul propus are o precizie mare și urmărește fidel comportamentul real al bateriilor testate. De asemenea, este relativ simplu de adaptat la alte tipuri de baterii Li-Ion.

Sistemele de stocare de energie folosesc un număr mare de acumulatori pentru a atinge obiectivele de putere și energie cerute de aplicație. În majoritatea cazurilor, acumulatorii sunt conectați în serie și/sau în paralel într-o topologie statică. Principalul dezavantaj este că variațiile bateriilor individuale vor cauza în timp reducerea capacității și scoaterea din uz prematură. Schemele de conectare reconfigurabile au generat un interes crescut din partea cercetătorilor în ultimii ani, datorită avantajelor față de schemele de conectare clasice: topologia de conectare poate fi schimbată dinamic în timpul utilizării, bazat pe condițiile în timp real ale sarcinii. În literatură au fost propuse o serie de topologii de reconfigurare: JPL [10], serie [11], DESA [12], grafuri, etc.

O soluție notabilă de minimizare a degradării este SHARE [13], care propune gruparea bateriilor cu SOH similar, într-o configurație JPL. Metoda CSR [14] omite selectiv baterii pentru optimizarea energiei furnizate și este bazată tot pe o configurație JPL. Deși aceste soluții prezintă rezultate în reducerea degradării bateriilor, performanța este în general scăzută iar algoritmi utilizați sunt prea complecși pentru a fi implementați într-un BMS embedded.

În domeniul arhitecturilor BMS există câteva modele reprezentative, iar cea mai răspândită este arhitectura de tip ierarhic, având scalabilitatea, flexibilitatea și toleranța la defecte ca avantaje principale. O altă clasificare a BMS este prezentată în Figura 1.

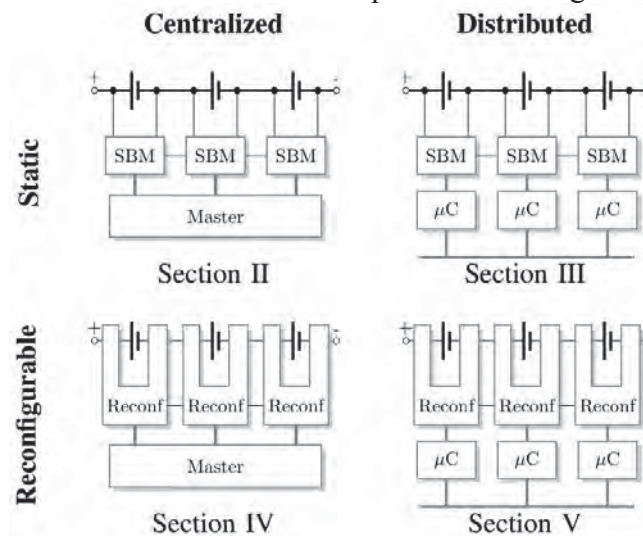


Figura 1 Clasificarea arhitecturilor de management a bateriilor [15]

Acest model de clasificare este realizat după topologia de organizare a bateriilor în grup, care poate fi statică sau reconfigurabilă, respectiv organizarea centralizată sau distribuită a structurii BMS [15].

### 3. Metodă pentru minimizarea degradării bateriilor

#### 3.1. Uniformizarea degradării la memoriile Flash

Cele mai cunoscute produse actuale care încorporează memorii flash sunt discurile solid-state (SSD), cardurile SD și cardurile eMMC. Acestea prezintă mai multe avantaje față de harddiskuri: viteză, fiabilitate, consum redus. Deoarece blocurile de memorie nu pot fi rescrise fără ștergere, legătura dintre matricea flash și sistemele de fișiere convenționale se face prin nivelul de translatare flash (FTL) [16]. Datorită numărului limitat de cicluri de ștergere și scriere, FTL trebuie să asigure o alocare cât mai uniformă a tuturor blocurilor prin tehnicile *garbage collection* și *wear leveling*. Există 2 tipuri de wear leveling: dinamic (pentru datele accesate des) sau static (pentru toate datele – permite uniformizarea degradării).

Primele strategii de uniformizare a scrierilor utilizau doar datele dinamice, dar performanța per total este scăzută, deoarece în medie, doar 25% din capacitatea memoriei este ocupată cu date dinamice. Dintre principiile și algoritmi existenți de wear leveling static putem aminti:

- Static wear leveling [17]: SWL, HaWL, RRWL
- Hot-cold swapping: Group WL [18]
- Cold-data migration: dual-pool, remaining-lifetime, lazy wear leveling (LWL) [19]

Autorii LWL doresc să amelioreze neajunsurile identificate în soluțiile existente, iar metoda propusă poate fi integrată bine cu implementarea standard de garbage collection din FTL. Astfel, wear leveling nu rulează decât declanșat de garbage collection deoarece FTL nu va șterge blocuri decât în urma garbage collection. Rezultatele evaluării arată că algoritmul propus este mai performant decât cele existente în aproape toate cazurile.

#### 3.2. Analogia grup de acumulatori-memorie flash și principiile metodei BWL

Analogia între cele două tehnologii poate fi privită din mai multe perspective, chiar dacă nu se pot echivala toate caracteristicile:

- structură: colecție de blocuri vs. colecție de baterii
- gestionare cicluri scriere-ștergere vs. încărcare-descărcare
- spațiu liber/ocupat vs. capacitate disponibilă/consumată (SOC)
- garbage collection vs. reîncărcare baterii utilizate în cicluri anterioare
- wear leveling static, substituie blocuri vs. migrarea sarcinii, substituie baterii

Pe baza acestor observații s-a trecut la dezvoltarea metodei Battery Wear Leveling (BWL), ce are următoarele principii directoare:

- este destinată pentru aplicații critice de stocare de energie (1k – 100k+ baterii)
- acționează asupra unui grup reconfigurabil de acumulatori (tip JPL, posibil alte tipuri)
- numărul de baterii conectate este  $f(\text{sarcina consumatorului})$ ; baterii de rezervă: 5%
- reconfigurarea grupului se face înainte de faza de descărcare
- faza de încărcare este o extensie a fazei de descărcare
- reconfigurare și realocare baterii: pe baza algoritmului de flash wear leveling static LWL [19]
- program de funcționare cunoscut apriori (ex.: automobil electric, tarifare diferențiată)

Un BMS care gestionează un grup reconfigurabil de acumulatori, bazat pe metoda propusă, poate fi conceput ca o soluție SW dedicată pe o platformă embedded. Acesta trebuie să fie un sistem autonom ce poate calcula SOC și SOH online și va integra metoda BWL pentru minimizarea în timp a degradării. Structural, este compus din mai multe blocuri funcționale interdependente prezentate în Figura 2, între care amintim Estimare SOC (obținere  $SOC_{start}$  per baterie) și Estimare SOH (aplicare model degradare, aplicare BWL, comandă comutatoare, interfațare sisteme externe).

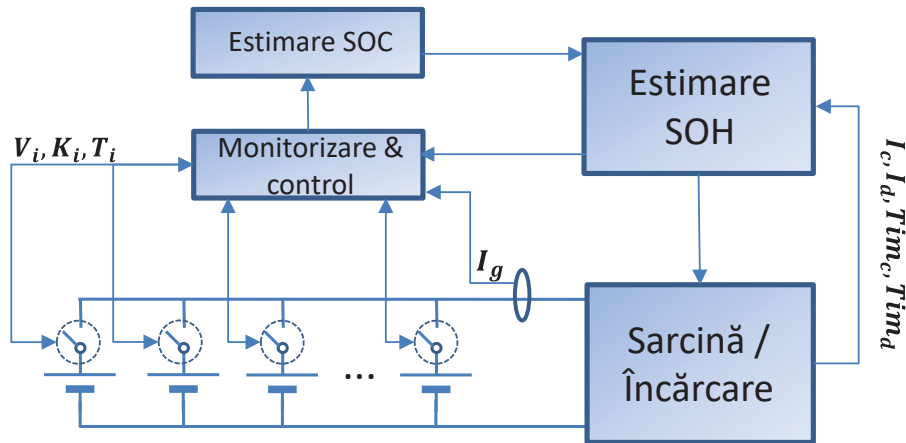


Figura 2 Schema de principiu a BMS propus

Elementele de circuit pasive precum comutatoarele și siguranțele, prezintă o influență semnificativă asupra costului, volumului ocupat și a performanțelor sistemului de stocare de energie [20]. În BMS existente întâlnim relee electromecanice sau semiconductoare. Releele semiconductoare au o serie de avantaje: fiabilitate, dimensiuni, timp comutație mic. În cazul acestora, pierderea de putere are loc cu precădere în faza de comutație. Gradul de reconfigurare al grupurilor de acumulatori este influențat de numărul de comutatoare, care impune limite cu privire la disiparea căldurii reziduale, creșterea dimensiunilor fizice ale sistemului și latența de comutare crescută, ce conduce la degradarea performanței.

### 3.3. Implementarea metodei BWL

Pornind de la premisa că faza de încărcare este complementară fazei de descărcare, selecția bateriilor bazată pe algoritmul de substituție LWL are loc doar în faza de descărcare. Calcularea scorului fiecărei baterii din grup în vederea selecției se face prin aplicarea formulei  $L_{scor}(b) = \omega_{SOC} \cdot G_{act}(b) \cdot SOC + \omega_{SOH} \cdot G_{act}(b) \cdot SOH$ , cu ponderi egale pentru SOH și SOC.

Nucleul metodei BWL este detaliat în extrasul de mai jos:

- 1: **cât timp** ( $I_g^{max} < I_d$ )
- 2:  $b \leftarrow top(L_{scor})$
- 3: **dacă** ( $(SOH_{avg} - b \cdot SOH) > SOH_{delta}$ )
- 4:  $b' = obtineBatBWL(b)$
- 5:  $G_d \leftarrow G_d \cup b'$
- 6: **altfel**
- 7:  $G_d \leftarrow G_d \cup b$
- 8: **stop dacă**
- 9:  $I_g^{max} \leftarrow I_g^{max} + I_b^{max}$
- 10: **stop cât timp**

Condiția de oprire a buclei exprimă condiția fizică impusă asupra grupului de acumulatori: curentul maxim furnizat de grup  $I_g^{max}$  să fie mai mare sau egal cu curentul de sarcină estimat pentru ciclul următor ( $I_d$ ). În primul pas, modelat după un algoritm de garbage collection, se extrage elementul (bateria) din capul listei  $L_{scor}$ . În pașii 3-8 se efectuează substituția (dacă este posibil) a blocului/bateriei selectate, cu un nou bloc/baterie, dacă degradarea blocului/bateriei inițiale este mai mare decât media cu mai mult de un prag prestabilit. Apoi, curentul maxim pe care îl poate furniza grupul  $I_g^{max}$  se recalculează în pasul 9 iar pasul 10 concludă bucla.



Algoritmul de încărcare se execută când sarcina este deconectată, iar calculul asigură un scor mai mare pentru un SOC mai scăzut:  $L_{scor}(b) = \omega_{SOC} \cdot (SOC_{max}(b) - G_{act}(b) \cdot SOC) + \omega_{SOH} \cdot G_{act}(b) \cdot SOH$ . Estimarea numărului de baterii se face pe baza istoricului iar selecția bateriilor este realizată simplificat, în mod descrescător după  $L_{scor}$  și după mărimea curentului.

#### 4. Metodologia de cercetare

În acest capitol se vor defini criteriile relevante pentru analizarea comparativă a performanțelor metodei propuse cu cele ale metodelor echivalente din literatură. De asemenea vor fi identificați și clasificați parametrii de funcționare a bateriilor, a metodei propuse, cât și a sistemului de stocare de energie.

Se propune următoarea listă de criterii de evaluare:

1. Durata de timp maximă în care sistemul este operațional; costul total de funcționare este direct proporțional și strâns legat de această durată de timp.
2. Capacitatea totală furnizată de sistem pe parcursul duratei de viață, sau gradul de satisfacere a cerințelor de sarcină ale sistemului.

Metoda propusă a fost proiectată și implementată la nivel de simulare în mediul de dezvoltare MATLAB iar pentru o evaluare cât mai relevantă a performanțelor metodei, a fost aleasă o serie de parametri a căror variație generează scenariile de simulare propuse. Acești parametri pot fi clasificați în două categorii, în funcție de natura acestora:

1. Parametri fizici, a căror variație este legată fie de o anumită mărime fizică fie de configurația fizică a grupului de baterii;
2. Parametri de calcul, sau parametrii algoritmilor, a căror variație va fi discutată în contextul detaliilor de implementare a algoritmilor ce compun metoda BWL.

Pentru cercetarea amănunțită a efectelor metodei propuse, este necesară modelarea cât mai fidelă a bateriilor considerate în cadrul testelor efectuate. În această lucrare s-a decis modelarea bateriilor de tip Panasonic NCR18650A (Qnom 3.07 Ah, 500+ cicluri). Simularea caracteristicilor bateriilor considerate are la bază modelul hibrid de degradare a capacității detaliat în [9].

În fiecare dintre scenariile de variație a parametrilor, detaliate în capitolul următor, se vor compara și discuta rezultatele obținute în următoarele 3 moduri de funcționare:

1. grup reconfigurabil cu aplicarea metodei BWL
2. grup reconfigurabil fără aplicarea metodei BWL
3. grup static, în care se folosesc toate bateriile în fiecare ciclu.

Condiția de terminare a funcționării va fi aceeași în toate modurile: sistemul nu mai poate susține sarcina la curentul cerut și pe perioada cerută. Topologia de organizare implicită a grupului de acumulatori studiat a fost stabilită la 64 de șiruri conectate în paralel, fiecare șir putând conține de la 1 la  $n$  baterii individuale. Pentru fiecare baterie componentă a grupului, SOH este evaluat la începutul fiecărui ciclu de încărcare sau descărcare și este de asemenea recalculat la terminarea ciclului respectiv.

În teză este prezentat un exemplu în care se poate observa direct efectul aplicării algoritmului de selecție bazat pe scorul ponderat SOH-SOC, din cadrul metodei BWL. Astfel după mai puțin de 10% din numărul de cicluri estimate pentru acest scenariu de simulare, a fost realizat efectul dorit de wear leveling.

## 5. Analiza performanțelor metodei BWL

Acest capitol prezintă, analizează și discută principalele rezultate obținute prin aplicarea scenariilor de simulare enunțate în capitolul anterior. Se vor analiza performanțele metodei propuse, atât prin prisma variației parametrilor fizici ai bateriilor componente ale grupului, cât și influența parametrilor de calcul. Pentru majoritatea scenariilor considerate, rata curentului de descărcare și încărcare a fost fixată la 16C,  $SOC_{start}$  a fost prescris la 75% iar durata ciclului de descărcare a fost limitată la 60 minute. Acest regim de funcționare este asemănător cu cele întâlnite în practică, la sistemele de stocare de mari dimensiuni [21].

### 5.1. Variația parametrilor fizici

În cazul variației SOH inițial ( $SOH_{init}$ ), timpul total util de funcționare scade în toate cele 3 moduri de funcționare considerate, în principal datorită scăderii valorii medii a SOH. Se observă că metoda BWL este cu atât mai eficientă cu cât variația capacității bateriilor crește, deoarece în funcționare metoda tinde ca, în timp, să egalizeze capacitățile acestora. Ca urmare, metoda BWL oferă o soluție optimă de management al bateriilor în cadrul BMS.

În cazul variației capacității utilizate, se observă că durata de funcționare crește substanțial pe măsură ce  $SOC_{start}$  și  $SOC_{mediu}$  sunt menținute la valori cât mai scăzute. În practică, trebuie găsit un echilibru între prelungirea duratei de viață și disponibilitatea sistemului.

În cazul variației curentului, s-au considerat 2 scenarii:

- valori diferite la fiecare rulare a simulării, pentru curentul constant pe durata unei rulări;
- curent variabil de la ciclu la ciclu.

Rezultatele arată câștigul substanțial adus de BMS reconfigurabil cu metoda BWL față de sistemul clasic, care crește invers proporțional cu valoarea puterii absorbite de sarcină. De asemenea se poate remarca o creștere accelerată și neliniară a ratei de degradare a SOH, odată cu creșterea curentului de sarcină, deoarece metoda BWL va selecta minimumul necesar de baterii pentru susținerea sarcinii.

În scenariul de variație a duratei ciclului de descărcare, s-a dorit simularea unui alt mod de funcționare ce poate fi întâlnit în realitate, în care sarcina este variabilă în timp datorită unor factori externi. Rezultatele arată că un BMS reconfigurabil care implementează metoda BWL permite menținerea relativ constantă a duratei totale de funcționare în condițiile unei plaje largi de variație a timpului sub sarcină, ilustrând efectele principale ale metodei propuse, de uniformizare a degradării și de extindere a timpului total util de funcționare.

În cazul variației temperaturii de lucru, se poate concluziona că rata cu care durata de funcționare se diminuează este apropiată de rata de degradare specificată de producător, și anume aproximativ 50% cu fiecare 10 °C de creștere a temperaturii. Această observație permite corectarea în timp real a estimărilor asupra duratei de funcționare rămase.

În scenariul variației topologiei grupului de acumulatori, am studiat modul în care numărul de baterii per modul influențează performanța grupului de acumulatori. Am pornit de la un număr de 40 de baterii pe care l-am crescut cu un pas constant de 20 pentru fiecare rulare, până la un număr maxim de 240 de baterii componente. Concluzia importantă a acestui experiment, este că un grup de acumulatori bazat pe metoda BWL poate fi scalat și dimensionat pentru orice aplicație, pe când un grup cu topologie statică își va pierde mult din eficacitate odată cu creșterea cerinței de putere.

În cazul variației elementelor auxiliare de circuit, am studiat impactul comutatoarelor asupra timpului total de funcționare al sistemului. Astfel, parametrul de interes pentru scenariul de față este rezistența electrică drenă-sursă a comutatorului în starea „deschisă” (în conducție), notat convențional cu  $R_{DS(on)}$ . Variația  $R_{DS(on)}$  a fost modelată de la valoarea de 50 mΩ, cu un pas de 50 mΩ, până la 1000 mΩ, pentru a cuprinde majoritatea valorilor rezistenței drenă-sursă în conducție a comutatoarelor de tip MOSFET existente pe piață. Rezultatele arată scăderea timpului util de funcționare odată cu creșterea valorii  $R_{DS(on)}$ . Practic, bateriile suportă un stres



(datorat curentului crescut) direct proporțional cu valoarea rezistenței menționate, performanța scăzând corespunzător. BMS cu BWL devine mult mai eficient decât BMS fără BWL, ceea ce demonstrează încă o dată performanța optimă ce poate fi obținută prin implementarea metodei propuse.

## 5.2. Variația parametrilor de calcul

În cadrul acestei secțiuni, vor fi prezentate și discutate rezultatele unor simulări care au ca obiectiv studierea efectelor pe care le au variațiile parametrilor de calcul.

În scenariul variației scorului SOH-SOC, am modificat valoarea ponderii pentru SOH pe întreg intervalul  $[0, 1]$ , cu un pas de 0,1. În cazul aplicării metodei BWL complete, se poate remarca o variație semnificativă a timpului total de funcționare, în funcție de ponderile considerate și se poate identifica un maxim al curbei ce se formează.

În cazul variației parametrului *SOHdelta*, am efectuat două teste: în primul am crescut valoarea pragului iar în al doilea am scăzut-o, în vederea determinării unei valori optime. O primă concluzie este că creșterea pragului de toleranță pentru variația SOH individual față de media grupului peste o valoare de 2% conduce practic la dezactivarea algoritmului de substituție BWL, deoarece toate bateriile din grup se încadrează în această marjă largă. Reducerea valorii acestui parametru conduce la creșterea timpului de procesare datorită creșterii numărului de rulări ale algoritmului de substituție, în practică fiind necesară găsirea unui raport optim între puterea de procesare utilizată și performanță.

## 5.3. Analiza performanțelor pe un set de date extern

În literatură există mai multe seturi de date public disponibile, ce exemplifică degradarea bateriilor Li-Ion în diverse scenarii de funcționare. În teză am ales un set de date de la Universitatea Oxford [22], pentru a rula pe acesta metoda propusă și pentru a verifica gradul de îmbunătățire adus.

În vederea evaluării performanțelor metodei BWL pe setul de date amintit, primul pas a fost procesarea profilelor de curent măsurate pentru a calcula un curent mediu per ciclu. Apoi s-a trecut la modelarea tipului de baterie utilizat prin identificarea parametrilor acesteia ( $K_{co}$ ,  $K_{ex}$ , etc.) pe baza datelor despre capacitatea bateriilor, măsurate lunar în cadrul experimentului. Pentru acest studiu s-a ales un număr de 64 de baterii, fiecare având o valoare a SoH inițial generată aleator în intervalul  $[0,9; 1]$ . Valorile parametrilor  $K_{co}$  și  $K_{ex}$  au fost de asemenea generate într-o manieră asemănătoare. Compararea s-a realizat între varianta de optimizare BMP și varianta echivalentă utilizând metoda BWL, rezultatele putând fi consultate în tabelul următor.

Tabel 1 Procent degradare SoH – BWL vs. BMP

Nr. ciclu	Degradare SoH în cazul BWL [%]	Degradare SoH în cazul optimizării BMP [%]
343	0,42	0,66
819	0,94	1,35
1431	1,64	2,54

Se poate remarca încă de la primele cicluri că aplicarea metodei BWL generează un grad de degradare SoH semnificativ mai mic decât metoda de referință. În concluzie, metoda BWL obține rezultate mai bune decât algoritmul de maximizare a profitului elaborat de autorii setului de date studiat.

## 6. Implementare practică BMS bazat pe metoda BWL

### 6.1. Nucleul BMS și programul demonstrativ

Acest capitol prezintă detaliile de implementare a nucleului unui BMS bazat pe metoda BWL pe o serie de platforme hardware și software de tip PC și embedded cu consum redus de energie. Se va face și o analiză comparativă în care se vor discuta avantajele și dezavantajele acestor implementări. Programul demonstrativ ce a fost rulat în acest studiu consta în aplicarea metodei BWL asupra unei serii de date ce cuprinde cicluri complete de încărcare și descărcare a bateriilor componente ale unui grup reconfigurabil, până la îndeplinirea condiției de terminare (SoH mediu < 70%).

Pentru o comparație obiectivă între platformele de implementare, am utilizat aceleași date de intrare și același cod sursă al funcției care implementează nucleul BMS-ului. Acesta a fost implementat și verificat inițial în mediul MATLAB, apoi a fost portat în limbajul C utilizând un proces semi-automatizat. Concluzia acestei etape de portare și adaptare a programului demonstrativ din MATLAB este că acest proces este fezabil și reduce mult timpul de evaluare a noilor algoritmi, comparativ cu metoda manuală de portare.

### 6.2. Platforme HW și SW pentru implementare

Caracteristicile platformelor alese acoperă o plajă largă de variație a performanțelor în termeni de timp de execuție, de memorie ocupată și de energie proprie consumată, oferind informații practice care se pot dovedi relevante celor care vor dori să implementeze metoda propusă într-un sistem funcțional.

MATLAB pe platforma Windows x86\_64 a fost utilizat pentru calcule, simulări și grafice necesare în vederea implementării practice a metodei BWL. În cazul GNU/Linux WSL pe platforma x86\_64, am gestionat fișierele sursă cu suita de unelte *CMake* și suita de compilare *gcc*, integrate în editorul Visual Studio Code.

Raspberry Pi (RPi) face parte din categoria Single Board Computer (SBC) dar poate fi clasificat ca un sistem embedded. Sistemul de operare este Raspberry Pi OS, o variantă a Debian Linux, ca urmare s-au putut refolosi același proces și aceleași unelte de gestionare a codului sursă ca și în cazul platformei WSL.

În cazul platformei Nordic nRF ARM Cortex-M4F, am utilizat placa de evaluare nRF52840 DK și software development kit (SDK) oferit de producător. Pentru dezvoltarea aplicației BMS propusă, am ales mediul de dezvoltare PlatformIO cu o configurație de Arduino. Implementarea programului demonstrativ bazat pe metoda BWL a fost realizată fără dificultate, deoarece funcția nucleu *bwl\_sim()* a fost executată repetat direct din funcția *loop()* din Arduino.

Platforma EFM32GG-STK3700 este bazată pe microcontrolerul Silicon Labs EFM32, unul dintre cele mai eficiente din punct de vedere al consumului de energie. Am utilizat mediul de dezvoltare al producătorului, Simplicity Studio, iar măsurătorile de timp de execuție au fost efectuate prin citirea directă a rezultatelor recepționate pe PC prin adaptorul USB-UART integrat pe placa de dezvoltare.

### 6.3. Analiză comparativă a rezultatelor obținute

Pentru evaluarea practică a performanțelor nucleului unui BMS bazat pe BWL, pe platformele considerate, s-au ales următoarele 3 metrici:

1. timpul de execuție
2. memoria ocupată
3. energia consumată.

Tabelul următor prezintă sintetic cele mai relevante rezultate ale măsurătorilor efectuate.

Tabel 2 Rezultatele studiului de performanță BMS

Criteriu de performanță	Platforma				
	MATLAB/ Windows	GNU/Linux WSL	Raspberry Pi	Nordic nRF	EFM32GG
Timpu de execuție [s]	12.5 - 13.5	0.035 - 0.041	0.297 - 0.518	23.17 - 23.19	95.7
Memoria ocupată RAM/ROM [kB]	302.4 / 29.1	5.5 / 25.0	5.3 / 19.1	5.3 / 21.8	5.4 / 16.8
Energia consumată [J]	210-226	0.59 - 0.69	0.42-0.74	9.47-9.48	6.8

Platforma MATLAB a fost inclusă doar ca referință pentru evaluarea gradului de optimizare adus de celelalte implementări în limbajul C. Configurația GNU/Linux WSL este cea mai performantă din punctul de vedere al timpului de execuție dar nu este o platformă embedded. Deși prețurile platformelor hardware RPi și Nordic nRF sunt similare, un BMS optimizat poate fi construit mai ieftin pe platforma Nordic nRF decât pe RPi, datorită componentelor auxiliare mai puține. Totuși, extensibilitatea și multiplele opțiuni de comunicație oferite de RPi fac din aceasta alegerea potrivită în cazul unui BMS complex.

## 7. Concluzii și perspective

Principalele contribuții aduse de această lucrare sunt:

- Cercetarea și sintetizarea stadiului actual al științei în mai multe domenii: estimare și predicție SOH, grupuri reconfigurabile de acumulatori, metode pentru uniformizarea degradării la memoriile Flash.
- Elaborarea și descrierea completă a unei metode inovatoare de maximizare a duratei de viață a bateriilor reîncărcabile.
- Elaborarea unor criterii obiective de performanță pentru evaluarea eficienței metodei propuse.
- Analiza domeniului sistemelor BMS cu accent asupra sistemelor de management al grupurilor reconfigurabile de acumulatori.
- Proiectarea detaliată a unui sistem de management pentru grupuri reconfigurabile de acumulatori ce utilizează metoda BWL.
- Dezvoltarea unui număr mare de scenarii de funcționare în vederea evaluării BMS propus.
- Implementarea și adaptarea BMS pe 3 platforme embedded de referință, cu consum redus de energie.
- Demonstrarea fezabilității metodei propuse prin evaluarea acesteia pe un set de date publicat de universitatea Oxford.
- Diseminarea cercetării doctorale prin publicarea a 3 articole științifice în jurnale indexate ISI.

O direcție posibilă pentru dezvoltare ulterioară este evaluarea impactului topologiei de reconfigurare asupra performanțelor, prin studierea mai multor configurații de conectare serie-paralel. Este important de analizat impactul implementării fizice a unui astfel de sistem, cum ar fi rezistența cumulată a comutatoarelor, posibilitatea apariției arcului electric, etc.

Cercetarea poate fi de asemenea continuată prin elaborarea practică hardware și software a unui sistem programabil de management al bateriilor reîncărcabile, care să se implementeze metoda BWL. Se vor putea studia aspecte ce țin de funcționarea practică a unui astfel de sistem, prin optimizări HW/SW, analiza costurilor de implementare, etc.

## 8. Referințe bibliografice

- [1] T. Bunsen, P. Cazzola, M. Gerner, L. Paoli, S. Scheffer, R. Schuitmaker, J. Tattini, J. Teter, "Global EV Outlook 2018: Towards cross-modal electrification.", May. 2018.
- [2] L. Ungurean, G. Cârstoiu, M. V. Micea, and V. Groza, "Battery state of health estimation: a structured review of models, methods and commercial devices," *Int. J. Energy Res.*, vol. 41, no. 2, pp. 151–181, Feb. 2017.
- [3] S. Ci, N. Lin, and D. Wu, "Reconfigurable Battery Techniques and Systems: A Survey," *IEEE Access*, vol. 4, pp. 1175–1189, 2016.
- [4] X. Hu, S. Li, and H. Peng, "A comparative study of equivalent circuit models for Li-ion batteries," *J. Power Sources*, vol. 198, pp. 359–367, 2012.
- [5] Z. Cen, P. Kubiak, "Lithium-ion battery SOC/SOH adaptive estimation via simplified single particle model", *Int. J Energy Res.*, pp. 1-16, 2020, <https://doi.org/10.1002/er.5374>.
- [6] N. Omar, M.A. Monem, et al., "Lithium Iron Phosphate Based Battery - Assessment of the Aging Parameters and Development of Cycle Life Model", *Applied Energ.*, vol. 113, pp. 1575–1585, 2014.
- [7] Texas Instruments, bq27531-G1: Battery Management Unit Impedance Track™ Fuel Gauge With MaxLife™ Technology for Use With the bq2419x Charger Controller, Datasheet, 2016. Available from: <https://www.ti.com/lit/gpn/bq27531-g1> [Accessed on 19 September 2020].
- [8] Maxim Integrated, MAX17047/MAX17050: 1-Cell Fuel Gauge with ModelGauge m3, Datasheet, 2016. Available from: <https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/MAX17047-MAX17050.pdf> [Accessed on 19 September 2020].
- [9] A. Millner, "Modeling Lithium Ion battery degradation in electric vehicles," in *2010 IEEE Conference on Innovative Technologies for an Efficient and Reliable Electricity Supply*, 2010, pp. 349–356.
- [10] M. Alahmad, H. Hess, M. Mojarradi, W. West, and J. Whitacre, "Battery switch array system with application for JPL's rechargeable micro-scale batteries," *J. Power Sources*, vol. 177, no. 2, pp. 566–578, Mar. 2008.
- [11] T. Kim, W. Qiao, and L. Qu, "Series-connected self-reconfigurable multicell battery", in *Proc. 26th Annu. Appl. Power Electron. Conf. Expo.*, Mar. 2011, pp. 1382–1387.
- [12] H. Kim and K. G. Shin, "DESA: Dependable, Efficient, Scalable Architecture for Management of Large-Scale Batteries," *IEEE Trans. Ind. Informatics*, vol. 8, no. 2, pp. 406–417, May 2012.
- [13] L. He, Z. Yang, Y. Gu, C. Liu, T. He, and K. G. Shin, "SoH-Aware Reconfiguration in Battery Packs," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 9, no. 4, pp. 3727–3735, Jul. 2018.
- [14] L. He, E. Kim, and K. G. Shin, "A Case Study on Improving Capacity Delivery of Battery Packs via Reconfiguration," *ACM Trans. Cyber-Physical Syst.*, vol. 1, no. 2, pp. 1–23, Feb. 2017.
- [15] S. Steinhorst, Z. Shao, S. Chakraborty, M. Kauer, S. Li, M. Lukasiewicz, and Q. Wang, "Distributed reconfigurable Battery System Management Architectures," in *2016 21st Asia and South Pacific Design Automation Conference (ASP-DAC)*, IEEE, pp. 429–434, 2016.

- [16] M. Yang, Y. Chang, C. Tsao, P.-C. Huang, Y.-H. Chang, and T.-W. Kuo, "Garbage collection and wear leveling for flash memory: Past and future," in *2014 International Conference on Smart Computing*, 2014, pp. 66–73.
- [17] Y. H. Chang, J. W. Hsieh, and T. W. Kuo, "Improving flash wear-leveling by proactively moving static data," *IEEE Trans. Comput.*, vol. 59, no. 1, pp. 53–65, 2010.
- [18] D. Jung, Y. Chae, H. Jo, J. Kim, and J. Lee, "A group-based wear-leveling algorithm for large-capacity flash memory storage systems," in *Proceedings of the 2007 international conference on Compilers, architecture, and synthesis for embedded systems - CASES '07*, 2007, p. 160.
- [19] L.-P. Chang, T.-Y. Chou, and L.-C. Huang, "An adaptive, low-cost wear-leveling algorithm for multichannel solid-state disks," *ACM Trans. Embed. Comput. Syst.*, vol. 13, no. 3, pp. 1–26, 2013.
- [20] S. Ci, "Energy information and Internet-based management and its applications in distributed energy storage system," *Proc. Chinese Soc. Elect. Eng.*, vol. 35, no. 14, pp. 3643–3648, Jul. 2015.
- [21] M. Dubarry, A. Devie, K. Stein, M. Tun, M. Matsuura, R. Rocheleau, "Battery Energy Storage System battery durability and reliability under electric utility grid operations: Analysis of 3 years of real usage", *J. Power Sources*, vol. 338, pp. 65–73, 2017.
- [22] J. M. Reniers, G. Mulder, S. Ober-Blöbaum, D. A. Howey, „Improving optimal control of grid-connected lithium-ion batteries through more accurate battery and degradation modelling”, *Journal of Power Sources* 379, 2018, pp. 91–102, <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2018.01.004>