



ROMÂNIA
UNIVERSITATEA „DUNĂREA DE JOS”
DIN GALAȚI



MINISTERUL
EDUCAȚIEI
CERCETĂRII
TINERETULUI
ȘI SPORTULUI

**STUDII ȘI CONTRIBUȚII PRIVIND INTEGRAREA
SISTEMELOR DE STOCARE A ENERGIEI ELECTRICE
UTILIZATE PE VEHICULE AUTONOME**

- Rezumat Teză de doctorat –

Conducător științific
Prof.dr.ing. Grigore FETECĂU

Doctorand,
ing. Elena VONCILĂ

Galați, 2012

C9709/01.10.2012

Către

Universitatea “Dunărea de Jos” din Galați vă face cunoscut că în data de 29.11.2013, ora 12⁰⁰, în FAȚIEE Y105, va avea loc susținerea publică a tezei de doctorat intitulată: **”STUDII ȘI CONTRIBUȚII PRIVIND INTEGRAREA SISTEMELOR DE STOCARE A ENERGIEI ELECTRICE UTILIZATE PE VEHICULE AUTONOME”**, elaborată de domnul/doamna **VONCILĂ ELENA**, în vederea conferirii titlului științific de doctor în Domeniul de doctorat - **Inginerie electrică**.

Comisia de doctorat are următoarea componență :

- 1. Președinte:** **Conf.univ.dr.ing. Marian GĂICEANU**
Universitatea “Dunărea de Jos” din Galați

- 2. Conducător de doctorat:** **Prof.univ.dr.ing. Grigore FETECĂU**
Universitatea “Dunărea de Jos” din Galați

- 3. Referent oficial:** **Prof.univ.dr.ing. Claudia POPESCU**
Universitatea POLITEHNICA din București

- 4. Referent oficial:** **Prof.univ.dr.ing. Bogdan ION**
Universitatea Tehnică “Gheorghe Asachi” din Iași

- 5. Referent oficial:** **Prof.univ.dr.ing. Nicolae BADEA**
Universitatea “Dunărea de Jos” din Galați

Cu această ocazie vă transmitem rezumatul tezei de doctorat și vă invităm să participați la susținerea publică. În cazul în care doriți să faceți eventuale aprecieri sau observații asupra conținutului lucrării, vă rugăm să le transmiteți în scris pe adresa Universității, str. Domnească nr. 47, 800008 - Galați, Fax - 0236 / 461353.



Prof.univ.dr.ing. **Julian Gabriel BÎRSAN**



Mulțumiri

Adresez mulțumiri tuturor celor care au contribuit la elaborarea acestei teze.

Mulțumesc domnului Prof. dr. ing. Grigore Fetecău pentru permanenta îndrumare științifică și suportul acordat în vederea realizării acestei teze de doctorat.

Respectuase mulțumiri membrilor comisiei pentru onoarea acordată de a participa la evaluarea rezultatelor cercetării mele.

De asemenea țin să mulțumesc domnului Prof. Javier Sanz Feito pentru oportunitatea de a lucra alături de dumnealui și echipa sa, în cadrul Laboratorului de Sisteme de Stocare a Energiei Electrice, Universitatea Carlos III, Madrid, Spania. Mulțumesc cercetătoarei dr. Lucía Gauchía Babé și doctorandei Sandra Patricia Castaño.

Mulțumiri speciale tuturor membrilor Departamentului de Automatică și Inginerie Electrică din cadrul Universității "Dunărea de Jos" din Galați.

Prietenilor mei pentru încurajări și înțelegere, în special ing. Mariana Niță, dr. Mónica Victoria Rojas Moreno și drd. Alina Florentina Săracu.

Imensă recunoștință părinților mei și surorii mele Aurora, pentru încrederea acordată și suportul continuu.

Ing. Elena Voncilă
Noiembrie 2012

Cuprins

Capitolul 1. Introducere	1
Capitolul 2. Stadiul actual al cunoașterii în domeniu	3
2.1. Efectele dezvoltării industriei auto asupra mediului	3
2.2. Măsuri pentru sprijinirea industriei vehiculelor verzi	3
2.3. Vehicule prietenoase cu mediul	4
2.3.1. Principalele categorii de vehicule electrice	5
2.4. Sisteme de stocare a energiei electrice utilizate pe vehicule ecologice autonome	6
2.4.1. Bateriile electrochimice	6
2.4.2. Supercondensatori	7
2.4.3. Pile de combustie	8
Capitolul 3. Sisteme de stocare a energiei electrice ce folosesc baterii Li-Ion	10
3.1. Structura unei celule Li-Ion	11
3.2. Parametri și caracteristici	13
3.2.1. Tensiunea la bornele bateriei	13
3.2.2. Tensiunea în circuit deschis	13
3.2.3. Rata de descărcare/ încărcare	13
3.2.4. Rezistența bateriei	13
3.2.5. Starea de încărcare	13
3.2.6. Capacitatea nominală	14
3.2.7. Energia nominală	14

3.2.8. Energie specifică	14
3.2.9. Densitatea energiei	14
3.2.10. Eficiența energiei	14
3.2.11. Puterea specifică	14
3.2.12. Efectul de memorie	14
Capitolul 4. Modelarea bateriilor Li-Ion	15
4.1. Modele analitice	15
4.2. Modele electrochimice	15
4.2.1. Teste EIS realizate pe bateria Li-Ion 7s8p MP176065 INT SW002	16
4.3. Modele bazate pe circuite electrice	18
4.4. Modelul propus pentru bateria Li-Ion	18
Capitolul 5. Identificarea parametrilor bateriei	23
5.1. Standul experimental	23
5.1.1. Bateria testată	23
5.2. Determinarea stării de încărcare a bateriei 7s8p MP176065 INT SW001	24
5.2.1. Determinarea stării de încărcare a bateriei 7s8p MP176065 INT SW001	24
5.2.2. Diagrama stării de încărcare a bateriei	24
5.3. Metoda propusă pentru identificarea parametrilor bateriei	25
5.3.1. Metoda de identificare a parametrilor bateriei la descărcare	28
5.3.2. Metoda de identificare a parametrilor bateriei la încărcare	30
5.4. Rezultate identificare parametri baterie	31
5.4.1. Căderea ohmică de tensiune	33
5.4.1.1. Prima zonă de cădere ohmică de tensiune	33

5.4.1.2. A doua zonă de cădere ohmică de tensiune	33
5.4.2. Tensiunea de polarizare și tensiunea în circuit deschis	33
5.4.2.1. Componenta corespunzătoare tensiunii de polarizare	33
5.4.2.2. Componenta corespunzătoare tensiunii în circuit deschis. Parametrul α	35
5.4.2.3. Componenta de polarizare în timpul perioadei de repaus	37
5.5. Funcțiile corespunzătoare comportamentului fiecărui parametru al bateriei implementat în model	41
5.5.1. Funcția corespunzătoare rezistenței interne R_0	42
5.5.2. Funcția corespunzătoare rezistenței de polarizare R_p .	42
5.5.3. Funcția corespunzătoare capacității de polarizare C_p	43
5.5.4. Funcția corespunzătoare parametrului α	44
5.5.5. Funcția corespunzătoare tensiunii în circuit deschis	45
5.6. Estimarea în timp real a SOC a bateriei Li-Ion utilizând tensiunea la borne a bateriei.	46
Capitolul 6. Simulare model baterie Li-Ion integrat pe un vehicul electric	49
6.1 Simulare baterie Li-Ion în Matlab / Simulink	49
6.2. Validare model baterie Li-Ion 7s8p MP176065 INT SW001	50
6.2.1. Descărcare în trepte prin aplicarea unui curent de 10 A	51
6.2.2. Descărcare și încărcare în trepte pe o perioadă de 200s	52
6.3. Simulare model vehicul electric realizat în Matlab/ Simulink	53
6.3.1. Instalație utilizată la simulare	53
6.3.2. Simulare vehicul electric	54
6.3.4. Validare model simulat	55
Capitolul 7. Concluzii generale și contribuții personale	58

7.1. Concluzii generale	58
7.2. Contribuții personale	61
7.3. Diseminarea rezultatelor	63
Bibliografie	65

Capitolul 1

Introducere

Comunitatea internațională susține dezvoltarea surselor alternative de energie și a industriei vehiculelor hibride și electrice, în vederea ameliorării efectelor negative ale transportului convențional.

Pentru ca vehiculele verzi să reprezinte o soluție de succes, este necesar ca sistemul lor de stocare a energiei electrice să fie fiabil, durabil și eficient. Tehnologia care reușește să răspundă acestor cerințe este cea a bateriilor *Li-Ion*. Un aspect foarte important în buna funcționare a bateriilor auto *Li-Ion*, îl reprezintă monitorizarea stării de încărcare a bateriei. O utilizare necorespunzătoare reduce durata de viață dar poate cauza și probleme de siguranță. Un model bun al bateriei se bazează pe o metodă precisă de identificare a parametrilor. Scopul acestuia este de a furniza informații corecte cu privire la comportamentul bateriei, pentru a obține un sistem performant de management al energiei.

În această teză este propus un model simplu pentru bateria *Li-Ion* capabil să reprezinte comportamentul dinamic al bateriei. Este prezentată o nouă metodă de indentificare a parametrilor bateriei bazată pe date experimentale și validată. De asemenea este propusă o nouă metodă de estimare a stării de încărcare în funcție de valoarea tensiunii la bornele bateriei în timpul funcționării acesteia. Rezultatele experimentale și cele obținute prin simulare au fost prezentate pentru a demonstra eficiența modelului propus și a metodei de indentificare a parametrilor în vederea simulării comportamentului bateriei.

Teza este structurată în șapte capitole, conținutul acestora fiind prezentat în continuare.

Capitolul 1 prezintă tema abordată în cadrul acestei lucrări și obiectivele principale ale acesteia.

În *Capitolul 2* este prezentat stadiul actual al cunoașterii în domeniul vehiculelor verzi și a sistemelor de stocare a energiei electrice utilizate la bordul acestora. Este realizată o scurtă prezentare a efectelor emisiilor poluante asupra mediului înconjurător. Sunt amintite măsurile adoptate de marile guverne ale lumii în vederea suținerii industriei vehiculelor ecologice ca alternativă la transportul convențional, unul dintre principalele sectoare poluante la nivel

mondial. Sunt prezentate principalele tipuri de vehicule prietenoase cu mediul și realizată o analiză comparativă a celor mai utilizate sisteme de stocare a energiei electrice pe vehicule verzi.

În *Capitolul 3* prezintă sistemul de stocare a energiei electrice de tehnologie *Li-Ion*, structura unei celule *Li-Ion* și principiul de funcționare al acesteia. Sunt prezentați în detaliu factorii ce influențează performanța acestor baterii, urmărindu-se stabilirea strategiei de testare.

Modelarea bateriilor *Li-Ion* este studiată în *Capitolul 4* al lucrării. Sunt prezentate principalele modele propuse în literatura de specialitate. O modelare corectă a sistemului de stocare a energiei electrice este esențială în simularea vehiculelor electrice și hibride. În cadrul acestui capitol este propus pentru bateria *Li-Ion* un model simplu bazat pe circuite electrice. În ecuațiile acestui model se introduce un nou parametru ce stabilește legătura dintre variația tensiunii în circuit deschis a bateriei și cantitatea de sarcină electrică inserată sau extrasă în timpul utilizării acesteia.

În *Capitolul 5* este propusă o nouă metodă de identificare a parametrilor bateriei *Li-Ion*. După o scurtă prezentare a sistemului complex de stocare a energiei electrice studiat și a standului experimental, sunt descrise în detaliu testele efectuate și metoda de identificare propusă. Metoda prezintă o nouă abordare a identificării parametrilor prin considerarea semnalului tensiunii la bornele bateriei în timpul funcționării ca fiind o sumă de două funcții: o funcție exponențială și o ecuație a unei drepte. Sunt identificați parametrii bateriei și calculate funcțiile corespunzătoare evoluției acestora cu starea de încărcare a bateriei. Prin intermediul metodei de identificare s-a demonstrat comportamentul asemănător al tensiunii la borne în timpul funcționării bateriei și al tensiunii la borne în perioada de repaus.

De asemenea s-a dovedit similitudinea dintre caracteristicile tensiunii în circuit deschis și a tensiunii la borne în funcție de starea de încărcare a bateriei. Acest rezultat este extrem de important deoarece el poate sta la baza elaborării un algoritm prin care starea de încărcare se estimează ținându-se cont de valoarea în timp real a tensiunii la bornele bateriei.

Capitolul 6 prezintă modelul bateriei *Li-Ion* realizat prin intermediul mediului de programare Matlab/ Simulink. Modelul bateriei este integrat în modelul simulat al unui vehicul electric. În urma analizării și comparării rezultatelor simulării cu rezultatele experimentale, modelul utilizat pentru baterie este validat, precum și metoda de identificare a parametrilor bateriei a căror funcții corespunzătoare au fost implementate în model.

Capitolul 7 prezintă concluziile finale și contribuțiile personale din cadrul tezei.

Capitolul 2

Stadiul actual al cunoașterii în domeniu

2.1. Efectele dezvoltării industriei auto asupra mediului

Poluarea masivă din ultimii ani, rapoartele negative privind situația actuală a mediului înconjurător și a resurselor naturale (petrol, cărbune, gaz natural) [VONG 11], predicțiile alarmante în ceea ce privește schimbările climatice, reprezintă motive solide pentru sprijinirea dezvoltării industriilor mai puțin poluante în vederea atingerii obiectivelor de decarbonizare, securitate a energiei și a calității aerului.

Strategiile liderilor mondiali țintesc diminuarea emisiilor de gaze cu efect de seră. În acest sens Comisia Europeană și-a propus o reducere a acestora cu 20 % până în 2020 în zona euro [DG TREN 10], [COM(2011) 112]. Atingerea acestui obiectiv este posibilă doar prin încurajarea utilizării resurselor regenerabile și creșterea eficienței energetice. În prezent, sistemul de transport este vinovat de aproximativ 25 % - 35 % din totalul de emisii de CO_2 în țările dezvoltate. Vehiculele pe bază de baterii și cele pe bază de pile de combustie oferă oportunitatea de a rupe dependența dintre transport și petrol, deschizând noi orizonturi în vederea îmbunătățirii securității energiei [TGW 12]. De asemenea, aceste vehiculele produc zero emisii la țeava de eșapament, contribuind semnificativ la îmbunătățirea calității aerului.

2.2. Măsuri pentru sprijinirea industriei vehiculelor verzi

Au fost adoptate măsuri legislative pentru a se încuraja dezvoltarea pieții vehiculelor verzi prin reducerea și chiar eliminarea în anumite regiuni, a subvențiilor pentru carburanți și impunerea de taxe mari pentru mașinile poluante (ecotaxa).

Măsura introducerii subvenției pentru vehiculele electrice a fost adoptată în majoritatea statelor Uniunii Europene, de exemplu: în Marea Britanie subvenția este de 5000 GBP, în Franța este 6000 EUR, iar în Spania suma este de 5000 EUR. România dorește de asemenea introducerea de subvenții pentru vehiculele prietenoase cu mediul, suma fiind stabilită la 5000 EUR. [VONG 11]. Aceste măsuri sunt necesare în contextul în care numărul de vehicule crește de la un an la altul.

Se estimează la nivel mondial, că numărul de mașini va atinge 2.9 miliarde până în 2050, doar în spațiul european vor fi aproximativ 500 de milioane de vehicule [CME 11], [VONG 11].

Guvernele lumii iau măsuri importante în vederea trecerii la o economie competitivă cu emisii scăzute de CO₂, în aria de interese fiind inclus și domeniul transporturi. În acest sens, U.E. a adoptat Strategia *Transporturi 2050*, prezentată de Comisia Europeană sub forma unei Cărți albe [COM(2011) 144] care vizează crearea unui *Spațiu unic european al transporturilor* mai competitiv, precum și a unei rețele de transport complet integrate care să pună în legătură diferitele moduri de transport, în vederea creșterii mobilității.

2.3. Vehicule prietenoase cu mediul

Între anii 1832 și 1839 au avut loc primele demonstrații în zona vehiculelor electrice Robert Anderson inventând primul transport electric alimentat de celule primare nereîncărcabile. [AND 10]. Frenchman Gustave Trouvé a realizat în 1881 un vehicul electric alimentat de un motor de curent continuu de 0.1 hp (0.07 kW), cu baterii pe bază de plumb și acid sulfuric. Un vehicul asemănător a fost realizat în 1883 de către doi profesori englezi, însă această realizare nu a fost apreciată datorită vitezelor mici pe care le putea atinge: 15-16 km/h.

Este important de menționat că în 1897, Frenchman M. A. Darracq descoperă și pune în aplicare întreg procesul de frânare recuperativă prin care elementul de stocare al energiei electrice este reîncărcat prin recuperarea energiei cinetice a vehiculului la frânare. Anul 1945 aduce cu sine inventarea tiristorului în cadrul laboratoarelor Bell (Bell laboratoire) făcând posibilă funcționarea motoarelor de curent alternativ la frecvență variabilă și utilizarea lor în industria vehiculelor electrice.

Electrovan, realizat în 1966 de către compania General Motors a fost primul vehicul propulsat de motoare de inducție, cu invertoare realizate cu tiristoare. Cu toate că în perioada 1980-1990 s-au materializat vehiculele EV1 (General Motors) [GMH 11] și 106 Electric (Peugeot Society Anonym), acestea nu au putut concura cu automobilele cu motoare cu combustie internă ce le-au surclasat datorită vitezelor mari, simplitatea la realimentare, cost mai mic. Echipamentul ce defavorizează vehiculele electrice este bateria electrochimică în contextul în care, unei cantități de 4.5 l de benzină capabilă să furnizeze 1800 Wh/kg la un vehicul

convențional (luându-se în calcul randamentul motorului cu combustie internă) îi corespunde o baterie *Pb-Acid* cu o greutate de aproximativ 270 kg.

Ultimele apariții pe piața autovehiculelor electrice promet emisii zero, o autonomie de până la 150 km (la o viteză maximă 100 km/h) și un timp de încărcare între 3-8 ore [VOL 12].

2.3.1. Principalele categorii de vehicule electrice

Vehiculele pur electrice.

Acest tip de vehicul are emisii zero din punctul de vedere al utilizării. Motorul electric este mult mai eficient ca motorul cu ardere internă, având randament superior. La motorul electric raportul dintre energia mecanică produsă și energia electrică folosită este în proporție de 90 %, comparativ cu motorul cu combustie internă care are un randament de aproximativ 35 %. Un procent de circa 65 % din energia provenită de la carburant se pierde prin căldură disipată și frecări în cazul motorului termic, în timp ce la cel electric aceste pierderi nu apar.

Încărcarea bateriei se realizează de la rețeaua generală de alimentare cu energie electrică, de la surse de energie amplasate în situri izolate sau prin frânare recuperativă.

Provocări: densitatea de energie a bateriei care este mică comparativ cu cea a combustibilului utilizat de vehiculele convenționale, costul bateriei, timpul de încărcare, greutatea, autonomia bateriei.

Vehiculele plug-in beneficiază de avantajele tehnologiei ecologie prin utilizarea unui motor electric și a unui acumulator reîncărcabil care trebuie să fie capabil să stocheze energia primită. Nu sunt independente de combustibilul pe bază de petrol, păstrând în configurația sa motorul cu combustie internă utilizat la alimentarea bateriei în cazul în care capacitatea acesteia scade sub un anumit nivel în timpul funcționării.

Aceste autovehicule pot utiliza energia electrică prin intermediul unei alimentări la o priză obișnuită, acasă sau în cadrul unei stații special amenajate în parcuri, centre comerciale sau puncte de alimentare din cadrul stațiilor de benzină. Aceste stații pentru vehiculele plug-in pot fi echipate cu control de la distanță.

Vehiculele hibride. Utilizează două surse de putere, îmbinând avantajele motorului cu combustie internă și cele ale motorului electric. Motorul cu combustie internă este utilizat pentru a produce electricitate și pentru a alimenta motorul electric, surplusul de energie fiind stocat de baterie.

Vehiculele cu pile de combustie. Pilele de combustie au avantajul major de a converti energia chimică direct în energie electrică, fără a produce poluare atmosferică, fiind un candidat ideal pentru sisteme de stocare a energiei electrice utilizate pe vehicule verzi. De asemenea eficiența ridicată, durata mare de viață, timp scurt de alimentare, reprezintă avantaje remarcabile ale pilelor de combustie. Provocarea principală o constituie stocarea H_2 , greutatea mare datorită cilindrilor cu H_2 și prevenirea exploziei în caz de accidente.

Ținând cont de studiile întreprinse în ceea ce privește costurile vehiculelor cu baterii și a celor cu pile de combustie, până în 2030 acestea vor reprezenta varianta cea mai ieftină din punctul de vedere al perioadei de funcționare a automobilului [VONG 11].

2.4. Sisteme de stocare a energiei electrice utilizate pe vehicule ecologice autonome

2.4.1. Bateriile electrochimice

În 1780, Luigi Galvani a descoperit procedeul de galvanizare pe care se bazează bateria electrochimică, studiile fiind continuate de Alessandro Volta, profesor de fizică la Universitatea Pavia din Italia, care în 1800 patentează prima baterie numită pilă voltaică. Aceasta era compusă dintr-o succesiune de discuri de argint și zinc separate prin hârtie îmbinată cu soluție salină, circuitul extern fiind realizat dintr-un fir metalic. În 1836, John Daniell a inventat o celulă primară în care hidrogenul era eliminat în timpul procesului de generare a electricității, aceasta reprezentând o variantă incipientă a pilei electrochimice de curent constant. Urmează apoi inventarea celulei de combustie cu hidrogen și oxigen de către Wiliam R. Grove în anul 1839 și importanta descoperire a acumulatorului de plumb reîncărcabil de către Gaston Plante în 1859. În anul 1866, Gaston Plante inventează pila de zinc–dioxid de mangan ($ZnMnO_2$), ce a fost constant dezvoltată, fiind utilizată și în zilele noastre. Inventarea bateriei nichel-cadmiu ($Ni-Cd$) s-a realizat 1899 de către suedezul Waldmar Jungner, catodul bateriei fiind realizat din Ni iar anodul din Cd . Tomas Edison găsește o soluție alternativă pentru Cd al cărui preț mare a afectat producerea la scară largă a bateriei inventate de Jungner, prin înlocuirea acestui material cu fier. Numeroase studii au fost întreprinse în vederea îmbunătățirii bateriei Bateria $Ni-Cd$, aceasta fiind utilizată cu succes timp de mulți ani în domeniul aplicațiilor portabile. [VIN 03]

În 1990 au apărut bateriile *Ni-MH*, având ca principal avantaj densitatea de putere mai mare decât a celor *Ni-Cd*. Capacitatea mare a acestor baterii și relația prietenoasă cu mediul sunt doi factori importanți ce au stat la baza promovării lor în detrimentul celor pe bază de *Cd*.

Primele baterii *Li-Ion* au fost concepute pentru prima dată în Japonia și introduse pe piață în anul 1991 de către compania Sony. Avantajele acestor baterii au surclasat celelalte tehnologii, oferind o combinație de tensiune mare la borne, densitate de energie și putere specifică mare, preț convenabil, acaparând piața telefoanelor mobile, a laptopurilor și a vehiculelor electrice și hibride. [DEL 01], [VIN 03]

Principalele elemente ale unei baterii sunt: electrodul pozitiv sau anodul, electrodul negativ sau catodul și electrolitul în care aceștia sunt cufundați și al cărui rol este de a oferi ionilor un mediu de transfer între cei doi electrozi în timpul funcționării bateriei.

În momentul descărcării și încărcării apar reacții electrochimice de oxidoreducere, respectiv de transfer de sarcină, electronii migrând de la un electrod la celălalt printr-un circuit extern.

La vehiculele electrice și hibride componenta cheie o reprezintă bateria. Pentru ca vehiculele verzi să concureze cu vehiculele convenționale, bateria trebuie să fie capabilă să stocheze o cantitate de energie suficientă pentru a oferi vehiculului o autonomie cât mai mare. O baterie utilizată pe un vehicul electric mediu trebuie să aibă o energie de aproximativ 30 kWh și să poată fi reîncărcată într-un timp cât mai scurt.

Bateriile vehiculelor verzi trebuie să îndeplinească condițiile de energie specifică, greutate și cost. Ideal ar fi ca bateria să nu fie schimbată niciodată, să aibă o durată de viață de cel puțin 10 ani, în consecință ar trebui să depășească 1000 de cicluri de funcționare [PISTOIA 10].

2.4.2. Supercondensatorii

Condensatorul este o unitate electronică care înmagazinează energie sub forma unui câmp electric între două armături încărcate cu o sarcină electrică egală, dar de semn opus. Terminalele condensatorului sunt conectate la două plăci de metal separate de un material dielectric care poate fi sticlă, ceramică, celuloză, porțelan. Supercondensatorul denumit și condensator în dublu strat este un condensator cu densitate de energie foarte mare, având un randament foarte bun.

Primul supercondensator a fost realizat în 1957 de către specialiștii de la General Electric, ce au utilizat electrozi de carbon pentru a crea mecanismul în dublu strat. În 1966 în cadrul unor teste pentru o pilă de combustie este redescoperit printr-o eroare și cercetat efectul condensatorului în dublu strat în cadrul companiei Standard Oil. Abia în anii 1990 acest dispozitiv este îmbunătățit și comercializat datorită bunelor rezultate obținute în domeniul materialelor și a metodelor de fabricație [BATTUNIV 12].

Condensatorul are două suprafețe conductoare care se numesc electrozi, cu sarcini egale dar de semn opus, o suprafață colectează sarcina pozitivă și cealaltă colectează sarcină negativă. Aceste suprafețe sunt separate între ele de un izolator care determină capacitatea condensatorului.

Avantajele supercondensatorilor în comparație cu bateriile sunt: durata de funcționare practic nelimitată, rezistența serie mai redusă ce permite o putere extrasă mai mare, încărcare și descărcare rapidă, metode simple de încărcare, nu este necesar un circuit de detecție a încărcării complete, eficiența în stocarea energiei electrice, densitatea de energie mică este compensată de durata mare de funcționare.

Dezavantaje: nu se poate utiliza tot spectrul de energie disponibil, densitate mai mică de energie comparativ cu bateriile (1/5 până la 1/10 din energia specifică a bateriilor, autodescărcarea este mai puternică ca la o baterie.

2.4.3. Pilele de combustie

William Robert Grove a pus bazele conceptului de pilă de combustie în 1839, prin realizarea unui dispozitiv ce producea apă și electricitate fiind alimentat cu oxigen și hidrogen într-o baie de acid sulfuric în prezența unor electrozi poroși din platină. Pilele de combustie au putut fi utilizate în cadrul aplicațiilor abia în anul 1960 când General Electric din Statele Unite au realizat pila de combustie cu schimb de protoni utilizată de N.A.S.A. pe echipamentele trimise în spațiu [GOU 11]. Pilele de combustie sunt capabile să convertească continuu energia chimică a unui combustibil în energie electrică și termică în absența unei reacții de combustie directă. Conversia se realizează în urma unor reacții electrochimice de oxidare care au loc în prezența unui combustibil gazos la anod și de reducere în prezența unui oxidant (oxigenul din aer) la catod. Uzual se utilizează drept combustibil hidrogenul, dar se mai pot folosi: gaze naturale, oxid de carbon și metanol [BER 02].

Tabelul 2.1. Principalele proprietăți și caracteristici ale sistemelor de stocare a energiei electrice [PDESP 07], [GIDDEY 2012].

Parametrii	Tehnologie					
	Baterii pe bază de				Super-condensatori	Pile de combustie PEMFC
	Plumb-Acid	Li	Sodiu-Sulf	Ni-Cd		
Energie Specifică (Wh/kg)	25-45	80-300	150-250	20-120	0.1-5	2000
Randament (%)	60 - 90	90 - 100	> 86	60 - 90	85 - 98	25 - 58
Tensiunea de operare (V)	2	4.1	2	1.2	2.5	1
Temp. de funcționare (°C)	-40 + 60	-30 +65	+300 +350	-20 +45	-30 +65	60-220
Avantaje	-costuri mici;	-densitate mare de energie; -randament bun.	-densitate mare de energie;	-densitate mare de energie; -randament bun.	-durată mare de viață; -randament bun.	-densitate foarte mare de energie; -H ₂ poate fi stocat pe termen lung
Dezavantaje	-Pb necesită reciclare;	-cost mare; -oxizii de Li necesită reciclare.	-cost mare de producție; -Na necesită reciclare.	-Cd este un compus toxic;	-densitate mică de energie -compuși toxici și corozivi. -tensiune de funcționare mică.	-costuri mari; -greutate mare.

Pe baza datelor prezentate în tabelul precedent se poate conculziona că în prezent, bateriile *Li-Ion* și cele *Pb-Acid* sunt sistemele de stocare care joacă rolul cel mai important în domeniul vehiculelor hibride și electrice, celelalte tipuri de baterii fiind mai puțin atractive. Din analiza comparativă reiese că bateriile *Li-Ion* au proprietăți și caracteristici mai bune ca cele pe bază de *Pb-Acid*, fiind considerate la ora actuală soluția cea mai viabilă pentru vehiculele verzi.

Capitolul 3

Sisteme de stocare a energiei electrice ce folosesc baterii

Litiu-Ion

Tehnologia bateriilor *Li-Ion* reîncărcabile a cunoscut o creștere impresionantă în ultimii ani și a reprezentat obiectivul multor cercetări importante în scopul de a obține un dispozitiv capabil să răspundă cerințelor clienților.

Avantajele bateriilor *Li-Ion* sunt: tensiune mare de funcționare (3.6 V – 4.25 V) de aproximativ 3 ori mai mare decât în cazul celor *Ni-Cd* și *Ni-MH*, densitate mare de energie, greutate mai mică pentru aceeași valoare a capacității stocate în comparație cu celelalte tipuri de baterii, lipsa efectului de memorie, domeniu larg de temperatură, autodescărcare foarte mică între 2 % și 8 % pe lună [KUR 09].

Primele baterii *Li-Ion* au fost comercializate de către Sony în 1991, tehnologia dezvoltându-se într-un ritm accelerat. În 2010 piața globală a acestui tip de acumulatori era estimată la peste 10 miliarde de dolari, corespunzător a 3.4 miliarde de baterii *Li-Ion* cu o energie cumulativă de 20 GWh. Pentru anul 2018, cifra de afaceri se estimează la aproximativ 32 miliarde de dolari corespunzătoare a 9 miliarde de baterii vândute cu o energie cumulativă de 75 GWh [RBS 11].

Tabelul 3.1. prezintă avantajele și dezavantajele bateriilor *Li-Ion*. Este important de precizat că acest tip de baterii, pe lângă valori mari ale densității de energie, energiei specifice și eficienței energetice, nu necesită mentenanță, celulele fiind etanșe. Au o durată mare de viață, în prezent fiind proiectate pentru 8 ani și se dorește ca până în 2025 această tehnologie să atingă o durată de viață de 15 ani [GER 12].

Domeniul de temperatură este destul de larg ($-30\text{ }^{\circ}\text{C} + 65\text{ }^{\circ}\text{C}$) comparativ cu tehnologiile utilizate pe vehicule electrice, în prezent realizându-se cercetări în vederea îmbunătățirii acestei caracteristici. Acest lucru este important deoarece autovehiculele sunt utilizate în diferite condiții de mediu, inclusiv condiții extreme. Temperatura de funcționare în interiorul autovehiculului poate depăși valorile limitelor inferioară și superioară a domeniului de temperatura menționat anterior.

Tabelul 3.1. Avantaje și dezavantaje baterii *Li-Ion* [LINDEN 01]

<i>Avantaje</i>	<i>Dezavantaje</i>
<i>Celule etanșe ce nu necesită mentenanță</i>	<i>Cost inițial moderat</i>
<i>Durată mare de viață</i>	<i>Degradare la temperaturi mari</i>
<i>Funcționare la domeniu de temperatură extins</i>	<i>Necesită circuit de protecție</i>
<i>Rată mică de autodescărcare</i>	<i>Pierdere de capacitate și instabilitate termică la supraîncărcare</i>
<i>Durată mică de încărcare comparativ cu celelalte tehnologii</i>	<i>Posibilă instabilitate termică la distrugere</i>
<i>Densitate de energie mare</i>	<i>Bateriile în format cilindric au densitate de putere mai mică decât cele Ni-Cd sau Ni-MH</i>
<i>Energie specifică mare</i>	<i>Se degradează la descărcare sub 2 V</i>
<i>Eficiență energetică mare</i>	<i>Pierderea capacității la temperaturi mai mari de 65 °C</i>

Sistemul de management al bateriei (*BMS*) este componenta cheie pentru un sistem performant de stocare a energiei electrice. El are rolul de a asigura utilizarea în condiții optime a energiei din interiorul bateriei fără a exista riscul de deteriorare a echipamentului. Acest lucru este posibil prin monitorizarea și controlul proceselor de încărcare și de descărcare a bateriei.

BMS împiedică ca tensiunea bateriei să depășească limita superioară sau inferioară prin intreruperea curentului; în aceeași manieră acționează dacă temperatura bateriei sau a celulelor depășește domeniul de siguranță. De exemplu, la încărcarea unui sistem cu mai multe celule *Li-Ion*, *BMS* acționează în momentul în care celulele ating tensiunea maximă de încărcare. În acest moment, *BMS* dă comandă ca încărcarea să se oprească. În cazul în care una sau mai multe celule s-au încărcat înaintea celorlalte, *BMS* poate realiza o echilibrare a capacității celulelor în vederea încărcării maxime a întregului sistem. [ANDREA 10].

3.1. Structura unei celule *Li-Ion*

În 1991 apare pe piață prima baterie *Li-Ion* cu anodul realizat din carbon și catodul din straturi de $LiCoO_2$. Cercetarea în acest domeniu a început însă mult mai devreme în 1962 când s-a realizat un acumulator ce utiliza litiu metal ca material activ al anodului și un agent puternic de oxidare în vederea realizării catodului. Tensiunea obținută la bornele acumulatorului era de 3 V. Dezavantajul utilizării anodului din litiului metal îl reprezintă instabilitatea termică. Aceste

sisteme pot exploda în caz de avarie sau fenomene des întâlnite precum: condiții de suprasarcină, scurt-circuit, supraîncărcare.

Au fost dezvoltate baterii sigure, materialele pentru realizarea **electrozilor pozitivi** fiind: litiu oxid de cobalt ($LiCoO_2$); litiu oxid de nichel ($LiNiO_2$); litiu oxid de mangan ($LiMn_2O_4$); litiu fier fosfat ($LiFePO_4$).

Cel mai utilizat este $LiCoO_2$ cu o capacitate de 155 mAh/g și tensiune mare de 4.2 V, fiind ușor de preparat.

Materialele pe bază de $LiNiO_2$ au o capacitate mare 220 mAh/g însă tensiunea la borne este mai mică decât în cazul $LiCoO_2$ și $LiMn_2O_4$. Un dezavantaj important este dificultatea de a prepara materialul [LINDEN 01].

Electrozii pe bază de $LiMn_2O_4$ au capacitate mai mică, de aproximativ 120 mAh/g, și tensiunea la borne de 4.0 V, dezavantajul constând în pierderea de capacitate la temperaturi înalte comparativ cu materialele menționate anterior.

În cazul **anodului**, materialul utilizat este carbonul (grafitul) sau cocsul [DE 07]. Există o varietate de materiale pe bază de carbon, structura lor influențând proprietățile electrochimice, inclusiv capacitatea de intercalare a ionilor Li .

Există mai multe tipuri de materiale utilizate pentru **anod** [LINDEN 01]:

- carbon moale ce se obține prin grafitizarea materialelor la temperaturi înalte de 2000 °C până la 3000 °C;
- carbonul tare ce poate fi preparat din rășină fenolică. Carbonul tare nu poate fi ușor grafitizat chiar dacă este tratat la 3000 °C;
- materiale pe bază de cocs prelucrate la 1000 °C.

Migrarea ionilor de Li se realizează prin intermediul **electrolitului**. Acesta este realizat din solvenți organici de tip neapos: sare dizolvată într-un solvent organic.

Solvenții organici pot fi:

- carbonatul de etilenă în cazul electrodului negativ pe bază de grafit;
- carbonatul de dietilena sau carbonat de polipropilenă în cazul electrodului negativ pe bază de cocs [PAR 10].

Electrolitul organic are o conductivitate mai scăzută în comparație cu cel apos, astfel o conductivitate mai scăzută determină o autodescărcare mai mică și deci o durată de viață mai mare a bateriilor [AIF 09].

Principalele componente ale unei celule *Li-Ion*: carcasa sau învelișul exterior, dispozitivul de siguranță ce detectează temperatura din interiorul celulei și acționează în caz de defect, catodul și anodul, separatorul și celelalte elemente de siguranță.

Utilizarea abuzivă a bateriei *Li-Ion* determină în primul rând la reducerea duratei de viață, însă există și consecințe extrem de periculoase, bateria putând lua foc.

Procesul ce stă la baza funcționării bateriei *Li-Ion* este transferul ionilor de Li de la electrodul pozitiv la cel negativ în timpul încărcării și invers în cazul descărcării. Ionii de Li sunt inserați în structura moleculară a electrodului. În urma procesului de încărcare – descărcare, structura de grafit rămâne intactă și pregătită pentru repetarea procesului de inserare – dezinsere din timpul încărcării și descărcării bateriei.

3.2. Parametri și caracteristici

În acest subcapitol sunt prezentați principalii parametri ai bateriei precum și factorii care influențează funcționarea acesteia. În alegerea sistemelor de stocare sunt luate în considerare puterea specifică, energia specifică și numărul de cicluri de funcționare. Aceste mărimi trebuie să fie capabile să îndeplinească cerințele consumatorilor.

3.2.1. Tensiunea la bornele bateriei [V] este tensiunea la terminalele bateriei la aplicarea unei sarcini.

3.2.2. Tensiunea în circuit deschis [V] ce definește tensiunea la bornele bateriei când asupra acesteia nu se aplică nici o sarcină. Se notează *OCV*.

3.2.3. Rata de descărcare/ încărcare $C [A]$ – acest parametru măsoară rata la care se descarcă/ încarcă bateria în raport cu capacitatea maximă a bateriei. Astfel, rata de descărcare $1C$ reprezintă curentul de necesar pentru a descărca bateria într-un interval de o oră.

3.2.4. Rezistența bateriei [Ω]

Curentul ce străbate bateria în urma aplicării unei tensiuni este limitat de rezistența acesteia, conform legii lui Ohm.

3.2.5. Starea de încărcare este un parametru adimensional ce reprezintă capacitatea prezentă în baterie la un moment dat în relație cu capacitatea nominală a acesteia. Bateria complet încărcată are $SOC=100\%$, în timp ce la bateria în totalitate descărcată $SOC=0\%$.

3.2.6. Capacitatea nominală C [Ah] reprezintă sarcina electrică maximă ce poate fi acumulată în baterie. Se determină măsurând sarcina electrică debitată de acumulator pe o anumită perioadă de timp, la o viteză de descărcare dată și la o anumită temperatură. Timpul de descărcare reprezintă perioada în care bateria este descărcată cu un curent constant. Ea depinde de starea de încărcare, temperatură și profilul bateriei

3.2.7. Energia nominală [Wh]. Scopul bateriei este acela de a stoca energie iar acest parametru ce depinde de tensiunea bateriei și de sarcina sa, definește cantitatea totală de Wh disponibilă în timpul unei descărcări cu un anumit curent de la o stare de încărcare de 100 % până la tensiunea de prag inferioară.

3.2.8. Energia specifică [Wh/kg] este cantitatea de energie electrică stocată într-un 1kg din greutatea bateriei. Alături de energia ce poate fi consumată, se definește și greutatea bateriei necesară pentru a răspunde cerințelor consumatorului.

3.2.9. Densitatea energiei [Wh/m³]. Reprezintă cantitatea de energie stocată pe 1 m³ din volumul bateriei.

3.2.10. Eficiența energiei (randamentul)

Energia pierdută în timpul descărcării și încărcării bateriei apare sub formă de pierderi de tensiune. Astfel eficiența bateriei (randamentul) în timpul încărcării și descărcării poate fi definită în orice punct de funcționare ca raportul dintre tensiunea de funcționare a celulei și tensiunea termodinamică.

3.2.11. Puterea specifică [W/kg]

Se definește ca fiind puterea maximă raportată la greutatea bateriei pe care aceasta o poate produce într-o perioadă scurtă de timp.

3.2.12. Efectul de memorie

În urma testelor efectuate asupra bateriei *Li-Ion* nu s-a observat că bateria ar fi influențată de efectul de memorie ca în cazul bateriilor *Ni-Cd* de exemplu, unde acest fenomen este pronunțat și ușor de identificat. Acest efect se datorează unui proces de descărcare/ încărcare necorespunzător. Efectul de memorie este reversibil, bateria recuperându-și adevărata capacitate în urma realizării mai multor cicluri de încărcare/ descărcare complete.

Capitolul 4

Modelarea bateriilor Li-Ion

4.1. Modelele analitice

Modelele prezentate în [CHE 06], [RON 06] sunt bazate pe calcul matematic, având scopul de a identifica parametrii bateriei și datorită aproximării de complexitate redusă sunt mai ușor de utilizat decât modelele prezentate mai sus, cu toate acestea, aria lor de aplicație este limitată datorită abordării abstracte a comportamentului bateriei.

4.2. Modele electrochimice

Aceste modele iau în considerare procesele chimice specifice tehnologiei bateriei [HU 09], [SHA 11] și sunt modele precise capabile să prevadă comportamentul bateriei. În pofida acurateții lor, modelele electrochimice sunt foarte complexe, ecuațiile diferențiale neliniare care intră în componența lor sunt dificil de implementat, necesitând un volum foarte mare de lucru computerizat [FUL 94], [FUL 94], [ABU 04].

Modelele se bazează pe măsurarea impedanței electrochimice a bateriei în vederea caracterizării comportamentului dinamic. Sistemele electrochimice prezintă caracteristici neliniare, dar pe porțiuni mici se pot considera ca fiind liniare.

Testele se efectuează în domeniul frecvență (teste de spectroscopie electrochimică de impedanță - EIS). Este necesară aplicarea unui semnal de excitație asupra bateriei care va cauza o reacție a sistemului electrochimic.

În funcție de tipul semnalului de excitație, răspunsul bateriei va fi un semnal de tensiune sau de curent.

Testele se clasifică în două categorii:

- *galvanostatică*, prin intermediul căreia se controlează curentul continuu de încărcare sau de descărcare a bateriei. Semnalul de excitație utilizat este un curent sinusoidal. Răspunsul bateriei este o tensiune alternativă.
- *potențiostatică*, semnalul de excitație aplicat bateriei este o tensiune ce va genera un răspuns în curent alternativ a bateriei.

4.2.1. Teste EIS realizate pe bateria Li-Ion 7s8p MP176065 INT SW002

S-au realizat teste de spectroscopie galvanostatice pe o baterie *Li-Ion* cu o capacitate de 46 Ah, în Laboratorul de Sisteme de Stocare a Energiei Electrice (LSSEE) din cadrul Universității Carlos III, Madrid, Spania. Bateria notată 7s8p MP176065 INT SW002 este de tehnologie LiCo și este alcătuită din 56 de celule, fiecare cu o tensiune de 3.7 V.

Rezultatele obținute din testele efectuate pe bateria *Li-Ion* demonstrează că starea de încărcare a bateriei atât la procese de încărcare cât și la descărcare are un comportament similar, fenomenul de histerezis fiind extrem de mic (figura 4.1)

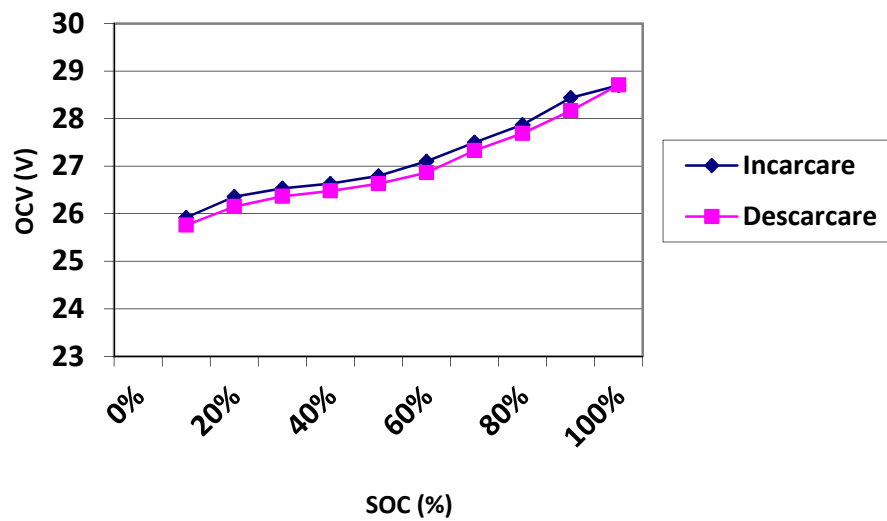


Figura 4.1. SOC a unei baterii *Li-Ion* de 46 Ah

În aceste condiții, testele EIS (spectroscopie de impedanță electrochimică) asupra bateriei *Li-Ion* pot fi realizate pentru o valoare constantă a SOC a bateriei. Testele de tip galvanostatic constau în aplicarea unui curent de 5 A, obținându-se un răspuns al bateriei în tensiune alternativă care depinde de impedanța celulei electrochimice.

Testele EIS sunt efectuate pentru diferite nivele ale SOC, frecvența semnalului alternativ putând fi variată între 0.1 Hz și 1 kHz. Toate testele au fost realizate la o temperatură de 24 °C.

Figura 4.2. prezintă rezultatele în domeniul frecvență obținute pentru o baterie *Li-Ion* cu o capacitate de 46 Ah pentru diferite valori ale stării de încărcare: 90 %, 80 %, 60 %, 40 % și 20 %.

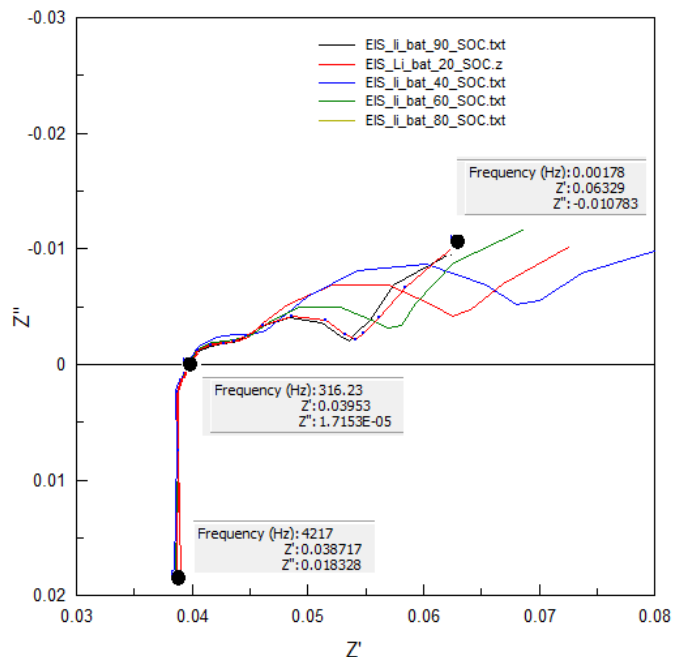


Fig. 4.2. Diagrama impedanței electrochimice pentru bateria *Li-Ion*

În urma rezultatelor obținute, impedanța electrochimică este reprezentată în planul Nyquist. Pentru simplitate valoarea opusă a părții imaginare se reprezintă de-a lungul axei ordonate, semibucla capacitivă fiind redată în cadranul superior drept. Rezultatele obținute cu analizorul de frecvență sunt introduse în programul *ZView* cu ajutorul căruia se pot vizualiza caracteristicile de impedanță obținute.

Rezultatele se interpretează astfel:

- din prima zonă, intervalul de frecvență 0 – 316 Hz extragem date cu privire la inductanța electrozilor și rezistența bateriei ce cuprinde rezistența electrolitului, a separatorilor, a conexiunilor; prima semibuclă capacitivă depinde de porozitatea electrozilor; a doua semibuclă capacitivă depinde de reacțiile de viteză mai mică ce au loc în interiorul bateriei.
- comportamentul inductiv al bateriei apare la frecvențe înalte peste 1kHz și este reprezentat în diagrama Nyquist printr-o linie.

În urma studierii și interpretării datelor s-a realizat un model echivalent capabil să reproducă caracteristicile reale ale bateriei. Există diferite variante de modele echivalente ce se pot crea cu softul *ZView*. Valorile parametrilor modelului pot fi ajustate astfel încât rezultatul să fie unul cât mai apropiat de realitate.

Erorile sunt calculate de către programul ZView prin compararea datelor experimentale cu cele obținute din simlarea modelului. S-a constatat că modelul nu este capabil să reproducă cu acuratețe comportamentul bateriei, erorile fiind foarte mari.

4.3. Modele bazate pe circuite electrice

Spre deosebire de modelele electrochimice, modelele bazate pe circuite electrice nu sunt extrem de complexe și pot fi implementate cu ușurință în strategii de control, simulând cu acuratețe comportamentul fizic al bateriei, utilizând elemente electrice cum ar fi rezistențe, rețele RC, surse ideale de tensiune, etc. [ABU 04]

Cel mai simplu model circuit electric al unei baterii conține o sursă ideală de tensiune în serie cu o rezistență internă constantă [HE 12].

Acest model poate fi utilizat într-un stadiu inițial de dimensionare a bateriei deoarece nu oferă informații cu privire la comportamentul dinamic al bateriei [GO 06].

Modele mult mai complexe au fost obținute având ca punct de plecare modelul Thevenin, prin adăugarea de componente electrice pasive și neliniare [HU 09], [CHA 00] capabile să furnizeze informații cu privire la procesele chimice interne ale bateriei.

4.4. Modelul propus pentru bateria Li-Ion

Circuitul electric echivalent utilizat pentru bateria *Li-Ion* testată în cadrul LSSEE este prezentat în figura 4.3. și se bazează pe cel propus de Thevenin [GAO 02], [CHA 00].

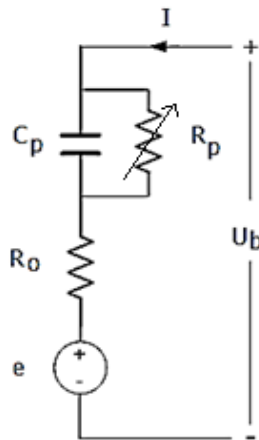


Fig. 4.3. Circuit echivalent baterie

În cadrul acestei teze este propus un nou model ale cărui ecuații sunt descrise de relațiile (4.1).

$$\left. \begin{aligned}
 e(t) &= e_0 - u_{OCV}(t) \\
 u_{OCV}(t) &= \alpha \int i dt \\
 u_{R0} &= i \cdot R_0 \\
 u_{RC} &= \int \frac{1}{C_p} \cdot \left(i - \frac{u_{cp}}{R_p} \right) \cdot dt \\
 u_b &= e - u_{R0} - u_{RC}
 \end{aligned} \right\} \quad (4.1)$$

Se consideră că răspunsul în tensiune al bateriei în urma aplicării unui curent de încărcare sau de descărcare, este influențat de două mărimi:

- Prima mărime u_{OCV} depinde de starea de încărcare a bateriei, variază cu aceasta (ecuația 4.1) și corespunde componentei tensiunii în circuit deschis.
- Cea de-a doua mărime, u_{RC} , definește procesul de polarizare care are loc în interiorul bateriei în timpul încărcării/ descărcării (ecuația 4.1).

Modelul prezentat în figura 4.3 are patru componente:

- Prima ecuație descrie **dinamica tensiunii în circuit deschis**, fiind utilizată în acest sens o sursă internă de tensiune care este definită de ecuația (4.2).

$$e(t) = e_0 - u_{OCV}(t) = e_0 - \alpha \int i dt \quad (4.2)$$

- Tensiunea inițială la terminalele bateriei este e_0 .
- Tensiunea u_{OCV} indică faptul că tensiunea internă a bateriei descrește liniar cu starea de încărcare anterioară a bateriei.
- Pentru a reprezenta variația tensiunii interne a bateriei în raport cu starea de încărcare a acesteia, se introduce un parametru global notat cu α și denumit generic **Impedanța caracteristică raportată a bateriei**. Acest parametru are ca unitate de măsură $[\Omega/h]$ și este dependent de proprietățile constructive ale bateriei, de starea de încărcare a acesteia, de temperatură și de timp. Prin intermediul acestui parametru se reprezintă dependența tensiunii la bornele bateriei cu cantitatea de Ah descărcați/ încărcați pe parcursul testelor.

Parametrul α poate fi calculat prin două metode. Prima metodă îl reprezintă pe α la general, pentru calculul acestuia fiind introdusă ecuația (4.3). Cea de-a doua metodă este mai laborioasă și este prezentată în *Capitolul 5 – Identificarea parametrilor bateriei*.

Prima metodă îl definește pe parametrul α ca fiind raportul dintre variația tensiunii în circuit deschis și capacitatea bateriei extrasă/ sau inserată în timpul testelor.

Astfel, în urma aplicării unui curent constant asupra bateriei, ΔU se calculează prin realizarea diferenței dintre valoarea tensiunii în circuit deschis la bornele bateriei de la începutul testului și valoarea tensiunii la bornele bateriei înregistrată la sfârșitul perioadei de repaus.

$$\alpha = \frac{\Delta U}{\Delta Q}, [\Omega/h] = [V/C] \quad (4.3)$$

După cum se poate observa în figura 4.4, la o aplicare în trepte a unui curent constant de descărcare, în cazul nostru 10 A, parametrul α nu este constant datorită variației valorii tensiunii în circuit deschis în funcție de starea de încărcare a bateriei.

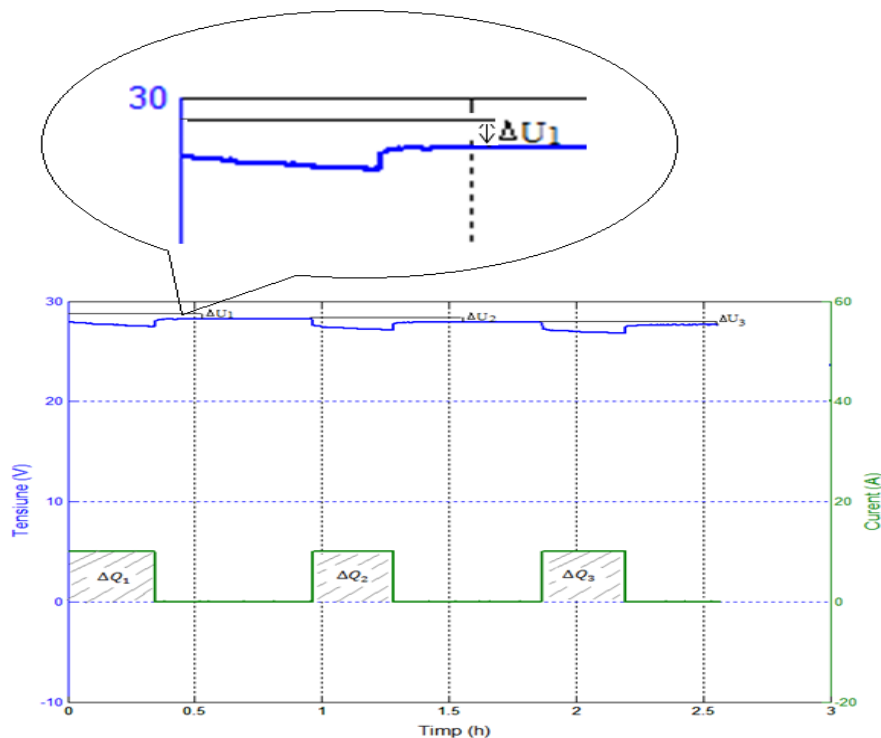


Fig. 4.4. Capacitatea bateriei la descărcarea în trepte cu un curent constant de 10 A.

Treptele de curent au aceeași perioadă de timp. Astfel, α pentru cele trei intervale de descărcare se calculează utilizând relațiile:

$$\alpha_1 = \frac{\Delta U_1}{\Delta Q_1}; \quad \alpha_2 = \frac{\Delta U_2}{\Delta Q_2}; \quad \alpha_3 = \frac{\Delta U_3}{\Delta Q_3}; \quad (4.4)$$

Curentul aplicat bateriei este constant și are aceeași valoare în cazul celor trei intervale de descărcare. Intervalele de timp luate în calcul au aceeași durată.

- **Căderea ohmică de tensiune** este cel de-al doilea element component al circuitului. Se calculează prin produsul dintre rezistența R_0 a cărei valoare este media rezistențelor calculate în timpul testelor și curentul aplicat bateriei care poate fi de descărcare sau de încărcare.

Formula de calcul a tensiunii u_{R_0} este:

$$u_{R_0} = i \cdot R_0 \quad (4.5)$$

- **Tensiunea de polarizare** este modelată printr-un circuit simplu RC, care introduce o cădere de tensiune adițională definită prin următoarea relație:

$$u_{RC} = \int \frac{1}{C_p} \cdot \left(i - \frac{u_{cp}}{R_p} \right) \cdot dt \quad (4.6)$$

- **Tensiunea la bornele bateriei** notată u_b , este calculată cu legea lui Kirchhoff astfel:

$$u_b = e - u_{R_0} - u_{RC} \quad (4.7)$$

În concordanță cu aceste ecuații modelul este implementat în Matlab/ Simulink prezentat în *Capitolul 6 – Simulare model baterie Li-Ion integrat pe un vehicul electric*.

Inițial, s-a realizat un model general al bateriei, cu parametrii constanti pe tot parcursul funcționării bateriei și nu sunt influențati de *SOC*. Valorile inițiale introduse în vederea simulării bateriei sunt:

Tabel 4.1. Valori parametri baterie *Li-Ion*

Parametru	Valoare
R_0	0.0143 ohm
C_p	3000 F
R_p	0.0143 omh
α	0.00003

Din comparația semnalului de tensiune obținut prin simulare și cel experimental obținut prin aplicarea unui curent de descărcare asupra bateriei *Li-Ion* se poate observa că modelul este capabil să simuleze comportamentul real al bateriei, cu eroare destul de mică la începutul zonei de repaus.

Se consideră că erorile obținute la cea de-a treia caracteristică se datorează faptului că bateria atinge o stare de încărcare sub 20 %, domeniu de funcționare nerecomandat.

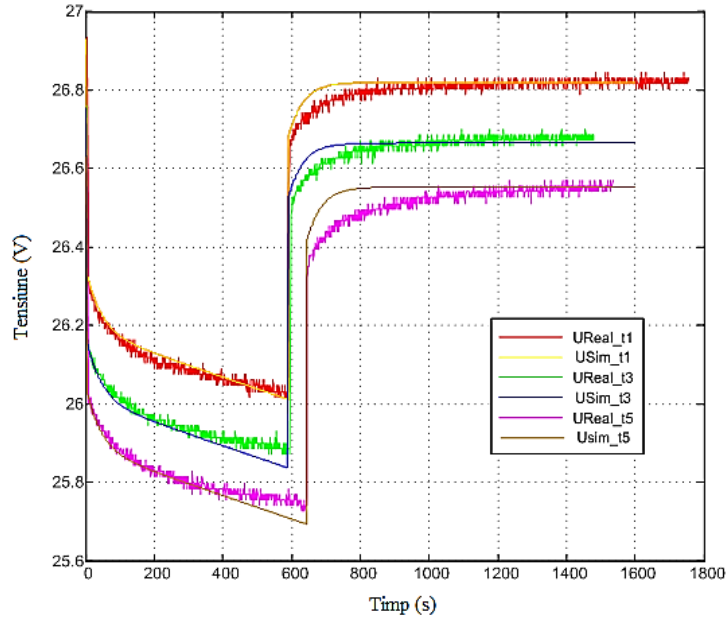


Fig. 4.5. Semnale de tensiune real și simulat al bateriei *Li-Ion*

Comparând datele obținute în urma simulării cu cele reale, se observă că prin utilizarea modelului se poate determina cu erori extrem de mici valoarea tensiunii în circuit deschis de la sfârșitul fiecărei perioade de relaxare. În consecință, prin intermediul acestui model se poate obține o estimare a valorii stării de încărcare a bateriei.

Rezultatele obținute demonstrează că modelul funcționează însă parametrii bateriei nu rămân constanți pe parcursul funcționării bateriei. Acești parametri sunt influențați în principal de starea de încărcare a bateriei. Este necesar obținerea unor funcții capabile să reproducă variația reală a fiecărui parametru al bateriei. Aceste funcții sunt calculate și prezentate în *Capitolul 5 - Identificarea parametrilor bateriei*.

Capitolul 5

Identificarea parametrilor bateriei

Testele în domeniul timp s-au realizat în Laboratorului de Sisteme de Stocare a Energiei Electrice (LESS) din cadrul Universității Carlos III, Madrid, Spania. S-a testat o baterie nouă, realizată special pentru laborator de către firma Amopack, distribuitor oficial SAFT.

Experimentele s-au desfășurat la temperatura camerei. Achiziția de date s-a realizat în timp real la interval de 1s. Datele au fost salvate sub fișier .csv fiind apoi prelucrate cu ușurință în mediul de programare Matlab. Parametrii identificați au fost tensiunea în circuit deschis, rezistența ohmică, rezistența de polarizare, capacitatea de polarizare, parametrul α . De asemenea s-a determinat constanta de timp a sistemului.

5.1. Standul experimental

5.1.1. Bateria testată

A fost testată o baterie nouă reîncărcabilă de tehnologie *Li-Ion*. Notată 7s8p MP176065 INT SW001 este de fapt un sistem complex de stocare a energiei electrice, realizat din 56 de celule MP176065 INT SAFT prismatice, cu o configurație de patru blocuri conectate în paralel, fiecare bloc fiind compus din două rețele de câte șapte celule în serie.

Tehnologia bateriei: Anod pe bază de grafit; Catod pe bază de LiCo; Electroliț realizat din solvenți organici.

Caracteristici electrice: Tensiune nominală: 25.9 V; Capacitate tipică (1C): 50 Ah; Energie nominală: 1.3 kWh.

Condiții de funcționare: Metodă de încărcare: Curent Constant/ Tensiune Constantă; Curent maxim de încărcare: 50 A la 20 °C; Domeniu de temperatură la încărcare: -20 °C până la 60 °C; Curent de încărcare recomandat: 25 A; Tensiune maximă de încărcare: 29.4 V; Curent maxim de descărcare: 50 A; Domeniu de temperatură la descărcare: -30 °C până la 55 °C; Tensiune limită de descărcare: 20.3 V.

Bateria are un sistem de protecție la suprasarcină și la supradescărcare ce se realizează prin controlul tensiunii celulei. De asemenea prezintă un stabilizator de tensiune MOSFET cu rolul de a controla tensiunea în cazul unui scurtcircuit la descărcare. Ambele protecții sunt

reversibile. În cazul unui supracurent la încărcare, protecția se realizează cu ajutorul unui fuzibil/termofuzibil, însă în acest caz, circuitul de protecție este ireversibil.

5.2. Determinarea stării de încărcare a bateriei 7s8p MP176065 INT SW001

5.2.1. Determinarea SOC a bateriei 7s8p MP176065 INT SW001

Avantajul metodei utilizate este simplitatea sa dar și precizia rezultatelor. Inconvenientul îl reprezintă timpul de repaus care trebuie respectat și care reprezintă intervalul în care tensiunea la bornele bateriei se stabilizează în urma unui test de descărcare. Măsurarea *OCV* se realizează la sfârșitul timpului de repaus, în caz contrar, calculul *SOC* va avea erori.

Pe baza rezultatelor obținute, se va calcula relația dintre *SOC* a bateriei și valoarea *OCV*, relație ce va fi mai apoi implementată în modelul bateriei pentru a se afla *SOC* în timp real.

S-au realizat următoarele teste pentru determinarea diagramelor *SOC* a bateriei la descărcare și la încărcare:

- Asupra bateriei complet încărcate se aplică în intervale de câte 30 de minute un curent de descărcare de 10 A, urmat de 90 de minute de timp de repaus.

Pe baza datelor obținute la testele de descărcare s-a calculat capacitatea bateriei obținându-se o valoare de 52 Ah. În consecință, 5 Ah reprezintă 9.6% din *SOC* a bateriei, astfel la fiecare interval de timp în care curentul a fost aplicat, bateria s-a descărcat cu 9.6 %

- Bateria este încărcată succesiv cu un curent de 10 A timp de 30 de minute, urmat de un interval de timp de repaus de 90 minute. Limita superioară a tensiunii impuse la încărcare este 29.4 V pentru întreg sistemul ceea ce corespunde unei tensiuni de 4.2 V pe celulă.

5.2.2. Diagrama stării de încărcare a bateriei

Diagrama *SOC* reprezintă caracteristica stării de încărcare a bateriei în timpul testelor de încărcare și descărcare, și se realizează prin măsurarea tensiunii în circuit deschis la sfârșitul fiecărei perioade de relaxare. Figura 5.1 prezintă variația *OCV* cu *SOC* atât la încărcare cât și la descărcare. Se poate observa că între cele două caracteristici există diferențe foarte mici, fenomenul histerezis în cazul bateriilor *Li-Ion* este existent însă de o valoare mică ce poate fi neglijată. În aceste circumstanțe s-a hotărât aflarea și utilizarea unei funcții medii pentru *SOC* a bateriei și implementarea ei în cadrul testelor de simulare.

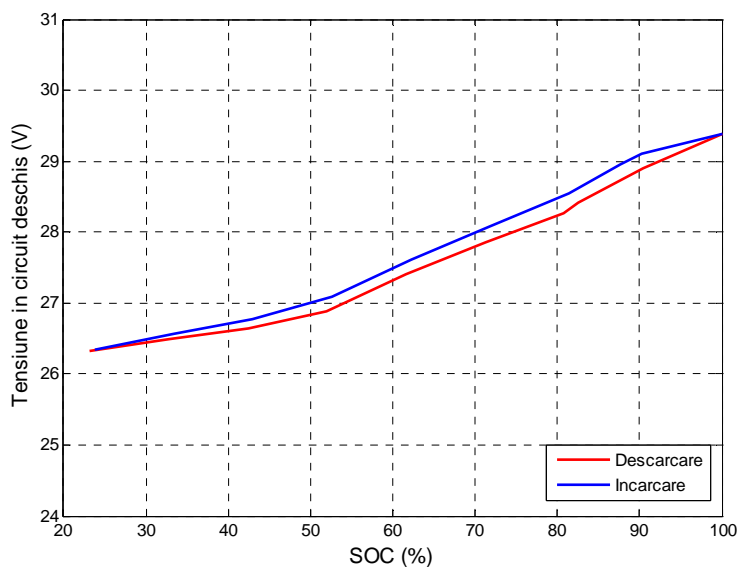


Fig. 5.1. Diagrama SOC la încărcare și descărcare pentru bateria 7s8p MP176065 INT SW001

Caracteristica SOC medie este prezentată în figura 5.2.

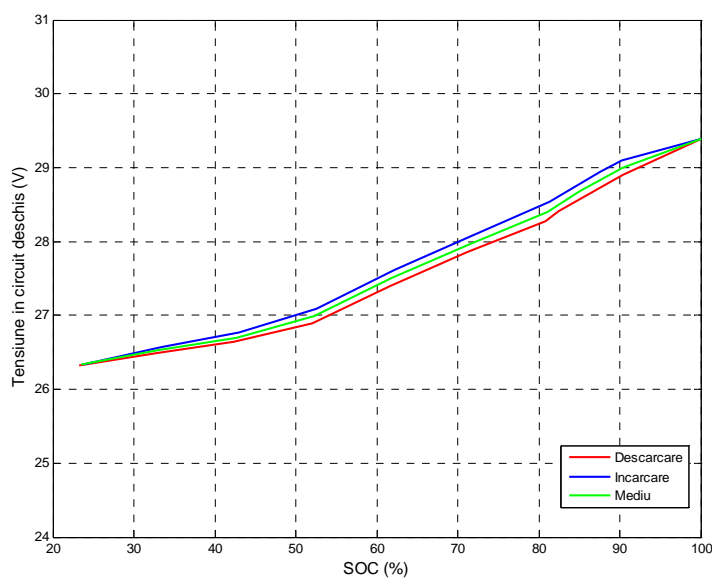


Fig. 5.2. Caracteristicile SOC pentru bateria 7s8p MP176065 INT SW001

5.3. Metoda propusă pentru identificarea parametrilor bateriei

Metoda propusă în această teză [VONLI 12] prezintă o nouă abordare a identificării parametrilor bateriei, rezultatele fiind validate experimental în următorul capitol.

Evoluția tranzitorie a tensiunii la bornele bateriei în timpul aplicării unui puls de curent de descărcare poate fi justificată ca fiind suma a trei termeni:

- căderea de tensiune instantanee ce apare la aplicarea curentului;
- componenta de tensiune internă ce descrește liniar cu *SOC* a bateriei;
- tensiunea relaționată cu procesele de difuzie și polarizare ale bateriei care de asemenea are o dinamică descrescătoare.

Semnalul de tensiune la bornele bateriei în timpul procesului de încărcare se definește ca în cazul testului de descărcare, cu specificația că evoluția termenilor este crescătoare.

Deoarece valoarea căderii de tensiune instantanee este ușor de identificat și nu necesită un calcul complicat, în continuare se va detalia metoda de identificare a parametrilor din momentul în care apare procesul de polarizare în interiorul bateriei.

Astfel, pentru a afla celelalte două componente, se ia în considerare tensiunea din momentul începerii procesului de polarizare, când semnalul începe să devină descendent (în cazul descărcării), respectiv ascendent (în cazul încărcării).

Metoda de identificare a parametrilor bateriei propusă în cadrul acestei teze se bazează pe descompunerea semnalului tensiunii bateriei într-o sumă de două funcții:

- prima este o exponențială;
- cea de a doua este definită prin ecuația unei drepte.

O abordare asemănătoare a fost prezentată în [HU 12], unde semnalul tensiunii bateriei a fost aproximat printr-o sumă de două funcții exponențiale, însă volumul de calcul este mare și anevoios. Metoda propusă simplifică calculul prin înlocuirea uneia din funcțiile exponențiale cu ecuația unei drepte.

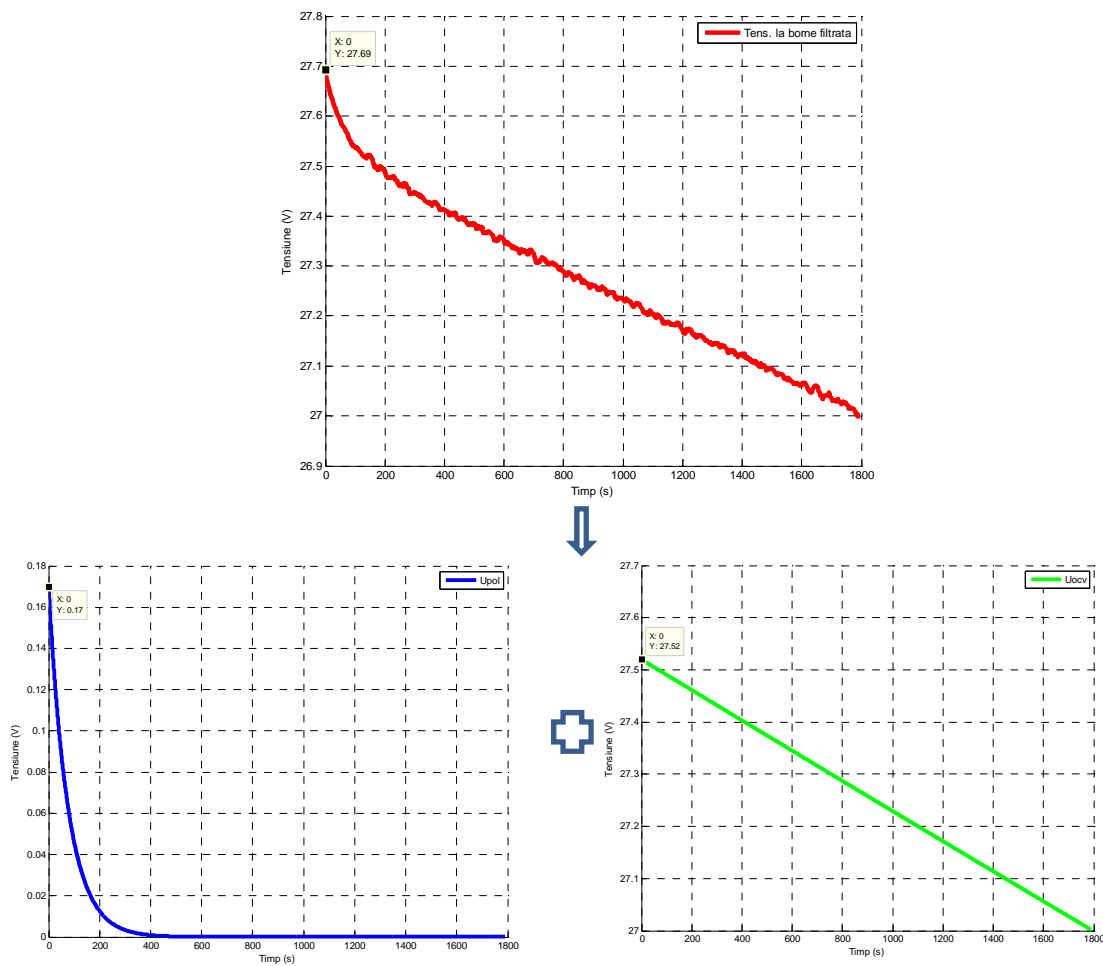


Fig. 5.3. Componentele tensiunii de descărcare

Cele două componente ce intră în alcătuirea semnalului tensiunii și sunt influențate de două fenomene distincte, sunt:

- primul termen notat u_{pol} este reprezentat printr-o funcție exponențială și corespunde componentei procesului de polarizare ce se desfășoară în interiorul bateriei pentru realizarea proceselor de descărcare/încărcare;
- cel de-al doilea termen este corespunzător componentei tensiunii în circuit deschis a bateriei, se notează cu u_{ocv} și este reprezentat prin ecuația unei drepte cu pantă negativă în cazul descărcării, respectiv pozitivă în cazul încărcării.

Funcția corespunzătoare procesului de polarizare, definit de o ecuație exponențială:

$$u_{pol}(t) = a \cdot \exp(b \cdot t) \quad (5.1)$$

Funcția corespunzătoare tensiunii în circuit deschis, definită de ecuația unei drepte:

$$u_{ocv}(t) = m \cdot t + n \quad (5.2)$$

Funcția corespunzătoare tensiunii la bornele bateriei:

$$u_b = u_{pol}(t) + u_{ocv}(t) \quad (5.3)$$

5.3.1. Metoda de identificare a parametrilor bateriei la descărcare

În figura 5.4 se pot observa caracteristicile reale ale tensiunii bateriei la descărcarea în trepte cu un curent de 10 A, pentru opt valori succesive ale stării de încărcare. Pe parcursul fiecărui test, bateria se descarcă cu 9.4 %, primul test începând de la 100 % SOC.

În urma prelucrării cu CfTool a semnalului filtrat al tensiunii din timpul primului test de descărcare, se obțin cele două funcții pentru componentele tensiunii la borne, din momentul în care este aplicat curentul și până când acesta devine zero.

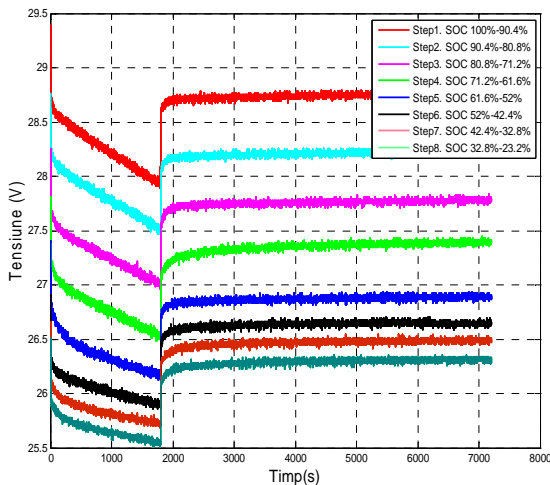


Fig. 5.4. Semnalele tensiunii la descărcare în trepte cu un curent de 10 A

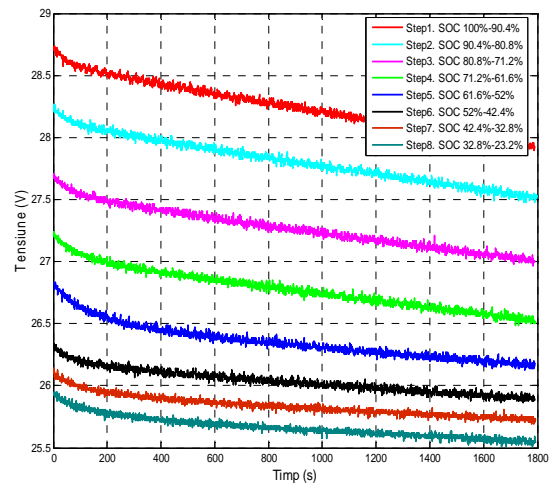


Fig. 5.5. Semnalele tensiunii la descărcare procesate cu CfTool/ Matlab

Tabel 5.1 Parametrii funcțiilor la descărcare

Etapa de descărcare	SOC (%)	a	b	n	m
Etapa 1	80.8	-0.22	-0.009	28.1	-3.2796e-004
Etapa 2	71.2	-0.16	-0.022	27.52	-2.8492e-004
Etapa 3	61.6	-0.1241	-0.0227	27.02	-2.7871e-004
Etapa 4	52	-0.24	-0.0114	26.5	-1.8994e-004
Etapa 5	42.4	-0.12	-0.01614	26.17	-1.5642e-004
Etapa 6	32.8	-0.1501	-0.00923	25.93	-1.1732e-004

- *Semnalele de tensiune corespunzătoare etapei 1 (80.8 % SOC)*

În figura 5.6 se observă răspunsul funcției exponențiale corespunzătoare fenomenului de polarizare. În figura 5.7 este prezentat răspunsul termenului definit prin ecuația unei drepte. Cele două semnale se însumează, funcția rezultantă fiind capabilă să reproducă comportamentul tensiunii bateriei în timpul procesului de descărcare (figura 5.8).

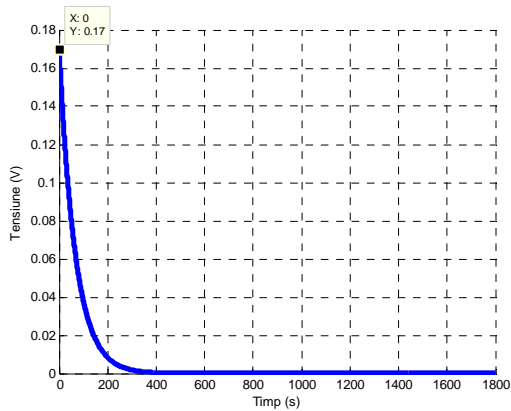


Fig. 5.6. Semnal funcție exponențială corespunzătoare procesului de polarizare

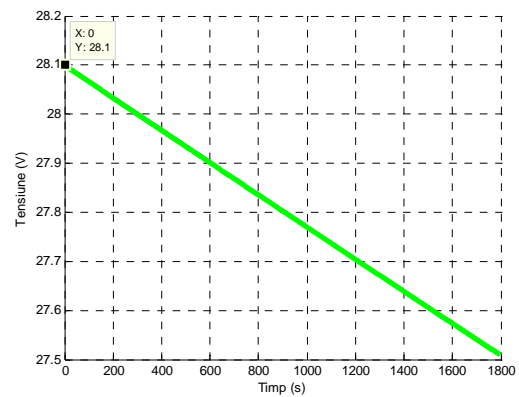


Fig. 5.7. Semnal funcție corespunzătoare tensiunii în circuit deschis

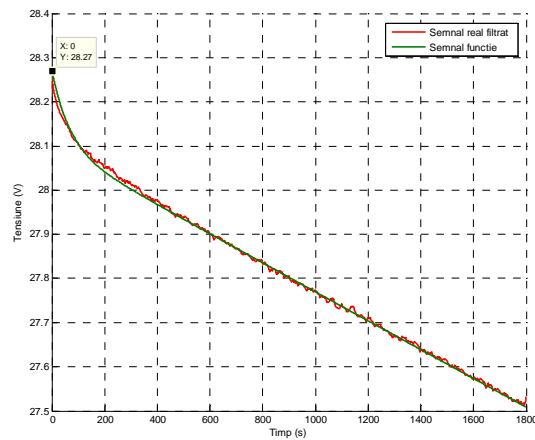


Fig. 5.8. Semnalul real filtrat al tensiunii și semnalul funcției obținute, la descărcare.

5.3.2. Metoda de identificarea parametrilor bateriei la încărcare

În figura 5.9 se pot observa caracteristicile tensiunii bateriei la încărcarea acesteia în trepte cu un curent de 10 A. Semnalele corespund unor valori diferite ale stării de încărcare a bateriei. Datele obținute din momentul în care începe fenomenul de polarizare până când curentul de încărcare devine zero (figura 5.10) sunt procesate cu ajutorul programului CfTool.

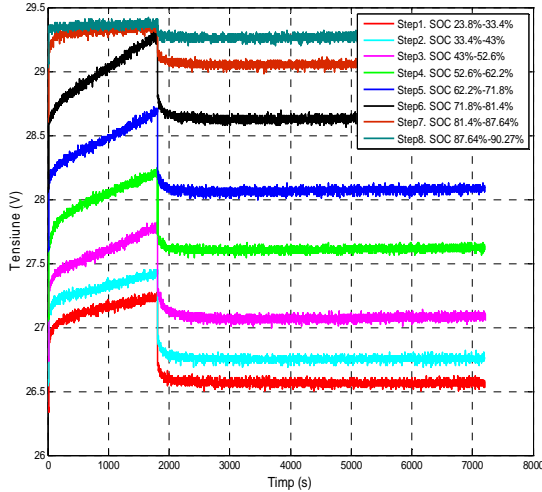


Fig. 5.9. Semnalele tensiunii la încărcare în trepte cu un curent de 10 A

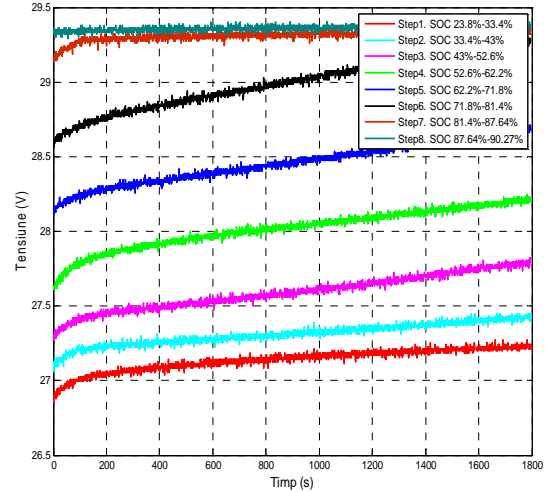


Fig. 5.10. Semnalele tensiunii la încărcare procesate cu CfTool/ Matlab

Tabel 5.2. Parametrii funcțiilor rezultați din CfTool

Etapa de încărcare	SOC (%)	a	b	n	m
Etapa 1	33.4	-0.22	-0.009	27.07	8.9286e-005
Etapa 2	43	-0.16	-0.022	27.21	1.2277e-004
Etapa 3	52.6	-0.1241	-0.022	27.41	2.1205e-004
Etapa 4	62.2	-0.24	-0.011	27.85	2.0647e-004
Etapa 5	71.8	-0.12	-0.016	28.24	2.5112e-004
Etapa 6	81.4	-0.1501	-0.009	28.72	3.1808e-004

- *Semnalele de tensiune corespunzătoare etapei 1 (33.4 % SOC)*

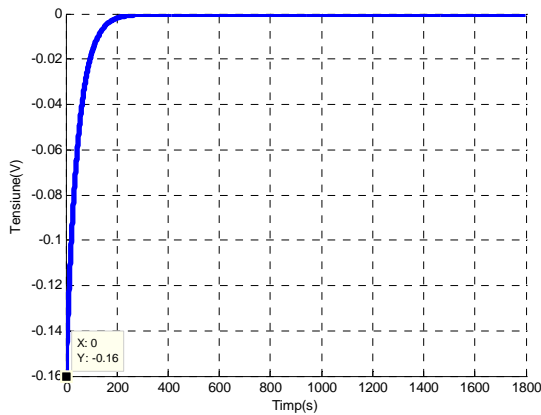


Fig. 5.11. Semnal funcție exponențială corespunzătoare procesului de polarizare

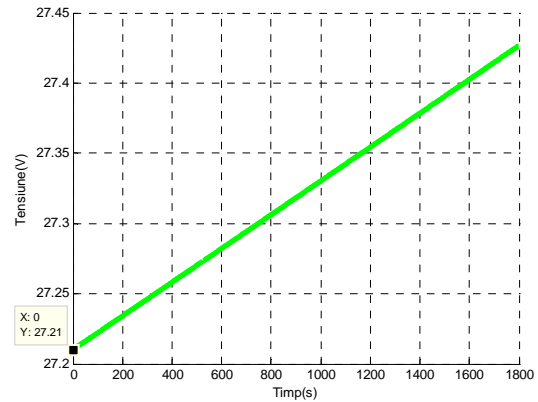


Fig. 5.12. Semnal funcție corespunzătoare tensiunii în circuit deschis

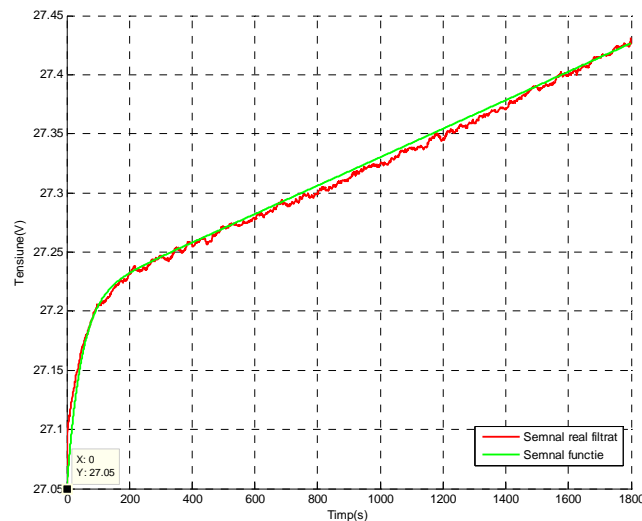


Fig. 5.13. Semnalul filtrat al tensiunii și semnalul funcției obținute, la încărcare

5.4. Rezultate identificare parametri baterie

S-au utilizat, în vederea identificării parametrilor bateriei, ecuațiile cunoscute ale căderilor de tensiune, tensiunii în circuit deschis, rezistenței de polarizare. Ca noutate s-a introdus un nou parametru, notat α numit: *Impedanța caracteristică raportată a bateriei*. Acest parametru, prezentat în *Capitolul 4*, reprezintă variația tensiunii interne a bateriei în raport cu starea de încărcare a acesteia. Analizând profilul tensiunii la descărcare și încărcare, se poate observa că la începutul fiecărui puls de descărcare, semnalul prezintă o cădere de tensiune U_{R01}

cauzată de trecerea curentului prin rezistența serie a bateriei care include rezistențele electrozilor, separatorului, electrolitului și rezistențele de contact [SHA 11]. Căderea de tensiune instantanee este urmată de o regiune în care tensiunea descrește exponențial.

În timpul acestei perioade, tensiunea la borne poate fi descompusă în două componente: o componentă exponențială descrescătoare și o componentă liniară. În momentul în care curentul devine zero, tensiunea prezintă o creștere instantanee U_{R02} .

Pe parcursul perioadei de repaus, tensiunea la borne se recuperează gradual până când se atinge o nouă valoare a tensiunii în circuit deschis.

S-au definit următorii parametri:

- U_1 - este tensiunea în circuit deschis, în momentul în care se aplică asupra bateriei curentul de descărcare, respectiv de încărcare;
- U_2 - este tensiunea bateriei în momentul începerii procesului de polarizare, se înregistrează aproape instantaneu, și se utilizează de asemenea la calcularea căderii de tensiune;
- U_3 - este tensiunea bateriei utilizată în calculul rezistenței de polarizare;
- U_4 - reprezintă tensiunea bateriei necesară calculării parametrului α nou introdus;
- U_5 - este tensiunea bateriei în ultimul moment în care curentul este diferit de zero;
- U_6 - este valoarea tensiunii la momentul în care curentul aplicat bateriei devine zero;
- U_7 - este valoarea tensiunii în circuit deschis, înregistrată la sfârșitul perioadei de repaus.

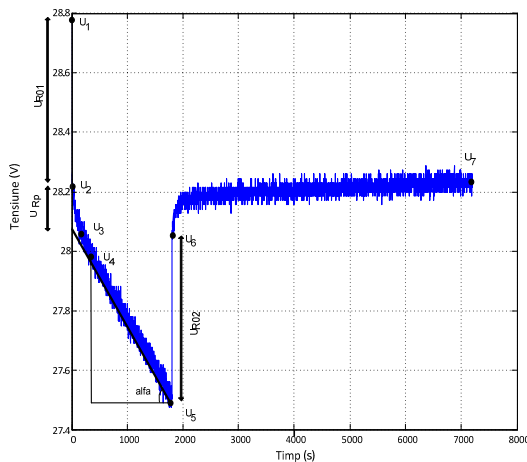


Fig. 5.14. Componentele răspunsului tensiunii la descărcare

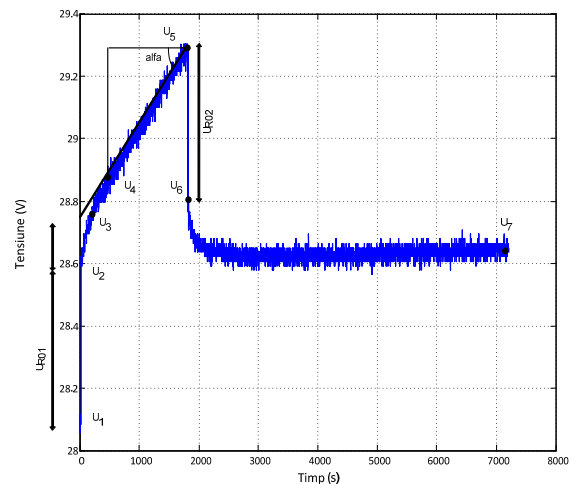


Fig. 5.15. Componentele răspunsului tensiunii la încărcare

5.4.1. Căderea ohmică de tensiune

5.4.1.1. Prima zonă de cădere ohmică de tensiune

Se consideră căderea de tensiune a bateriei în momentul aplicării curentului de descărcare, respectiv de încărcare. Valoarea căderii de tensiune se află utilizând relațiile (5.4) și (5.5).

- **la descărcare:**

$$\Delta u_{R01} = U_1 - U_2 \quad (5.4)$$

- **la încărcare:**

$$\Delta u_{R02} = U_2 - U_1 \quad (5.5)$$

5.4.1.2. A doua zonă de cădere ohmică de tensiune

Se consideră căderea de tensiune a bateriei în momentul stopării curentului de descărcare, respectiv de încărcare. Relațiile utilizate pentru calcularea valorii căderii de tensiune sunt (5.6) și (5.7).

- **la descărcare:**

$$\Delta u_{R02} = U_6 - U_5 \quad (5.6)$$

- **la încărcare:**

$$\Delta u_{R02} = U_5 - U_6 \quad (5.7)$$

5.4.2. Tensiunea de polarizare și tensiunea în circuit deschis

5.4.2.1. Componenta corespunzătoare tensiunii de polarizare

Polarizarea este procesul prin care pe electrozii bateriei se depozitează ionii care realizează conducția prin soluția electrolitului.

Pentru a se calcula rezistența de polarizare sunt necesare valorile U_2 și U_3 ale tensiunii la bornele bateriei. Prima valoare (U_2), este ușor de identificat, ea fiind folosită de asemenea și în subpunctul precedent în vederea obținerii valorii căderii de tensiune care apare când asupra bateriei este aplicat curentul.

Cel de-la doilea parametru definește procesul de polarizare care are loc în interiorul bateriei în timpul încărcării/ descărcării

În *Capitolul 4* se precizează că fenomenul de polarizare care are loc în interiorul bateriei în timpul încărcării/ descărcării este modelat prin intermediul unui circuit RC.

Pentru aflarea valorii U_3 a tensiunii este necesară cunoașterea constantei de timp a sistemului, care se identifică grafic prin trasarea unei drepte ce pornește din U_2 tangentă la curba de tensiune (figura 5.16). Cunoscând valoarea tensiunii la finalul procesului de descărcare (U_5), valoarea constantei de timp (τ) se poate calcula matematic, știind că este corespunzătoare valorii $0.63 \cdot U_5$.

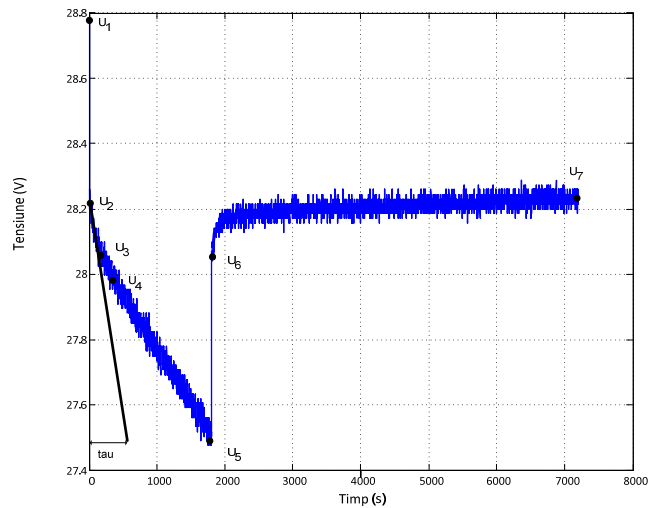


Figura 5.16. Constanta de timp a sistemului

Tensiunea de polarizare u_{Rp} este definită prin relațiile:

- *la descărcare:*

$$u_{Rp} = U_2 - U_3 \quad (5.8)$$

- *la încărcare:*

$$u_{Rp} = U_3 - U_2 \quad (5.9)$$

Dacă se cunosc valorile tensiunii U_3 și a constantei de timp a sistemului, se pot calcula valorile rezistenței de polarizare (R_p) și a capacității bateriei (C_p).

$$\tau = R_p \cdot C_p \quad (5.10)$$

$$C_p = \tau / R_p \quad (5.11)$$

Se poate observa în figura 5.17 comportamentul rezistenței de polarizare. Acest fenomen nu este unul linear, în consecință este necesar găsirea unei funcții capabile să reproducă comportamentul rezistenței atât la încărcare cât și la descărcare.

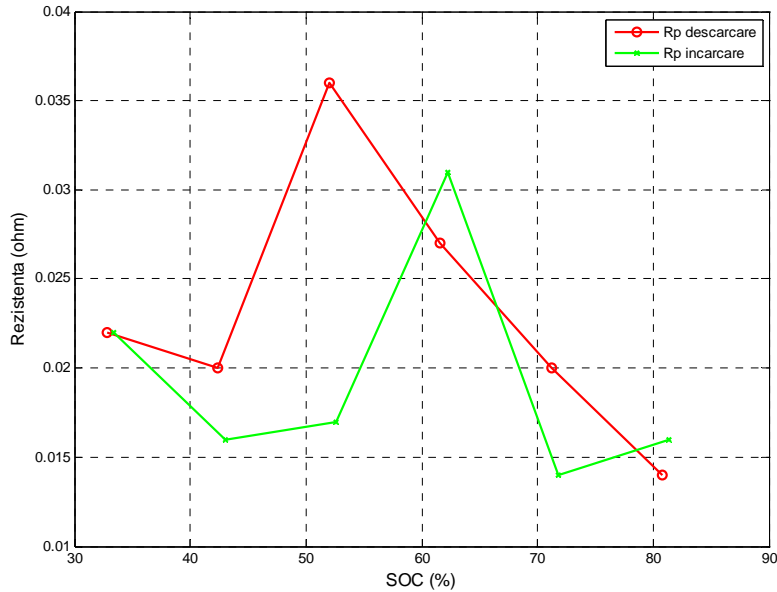


Fig. 5.17. Dinamica în timp real a lui R_p la descărcare și la încărcare

5.4.2.2. Componenta corespunzătoare tensiunii în circuit deschis. Parametrul α

Parametrul care caracterizează influența componentei tensiunii în circuit deschis este parametrul prezentat în *Capitolul 4* și notat cu α . Parametrul α se calculează în funcție de cantitatea de sarcină extrasă, respectiv inserată din baterie în timpul proceselor de descărcare, respectiv încărcare.

Parametru α acționează din momentul în care curba tensiunii de polarizare intră în regim permanent, fiind astfel foarte important să calculăm constanta de timp a bateriei în diferite regiuni ale stării de încărcare. Acest parametru se implementează în modelul bateriei.

O primă metodă de calcul a lui α este descrisă în *Capitolul 4*. Metoda este foarte simplă și este prezentată la *Subpunctul 4.4 - Modelul propus pentru bateria Li-Ion*.

Cea de-a doua metodă, este mai laborioasă dar descrie concret fenomenul și modul în care acesta acționează.

Atât la descărcare cât și la încărcare se trasează o dreaptă tangentă la semnalul filtrat al tensiunii începând cu ultimul punct al caracteristicii tensiunii corespunzător momentului în care curentul ia valoarea zero. Prin intermediul acestei tangente se află valoarea tensiunii U_4 cu

ajutorul căreia se calculează componenta tensiunii în circuit deschis. Valoarea lui U_4 corespunde momentului $5 \cdot \tau$.

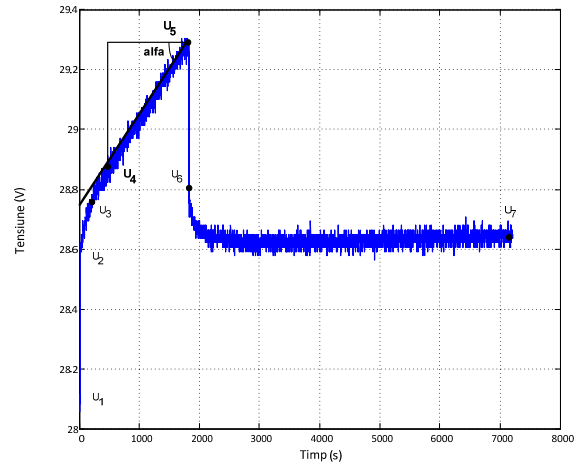
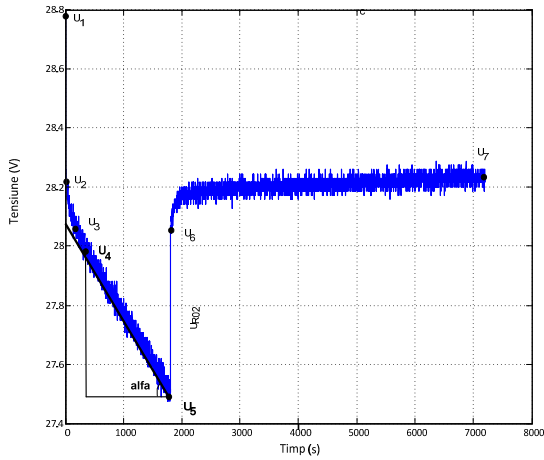
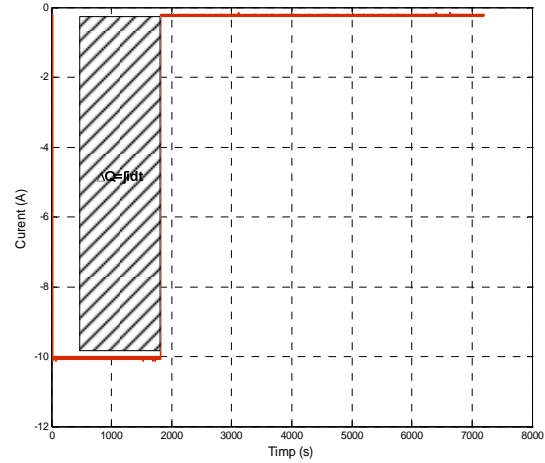
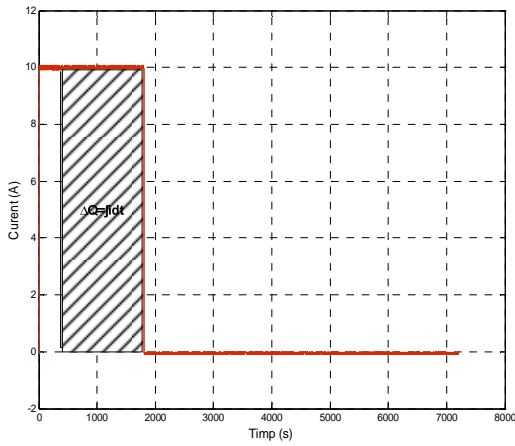


Fig. 5.18. Reprezentarea lui α la descărcare

Fig. 5.19. Reprezentarea lui α la încărcare

Se propune următoarea formulă pentru calcularea termenului α :

- **la descărcare:**

$$\alpha_{des} = \frac{U_4 - U_5}{I_{des} \cdot \Delta t} \quad (5.12)$$

unde: I_{des} este curentul de descărcare; Δt este intervalul de timp în care este acționată α_{des} .

- **la încărcare:**

$$\alpha_{incarc} = \frac{U_5 - U_4}{I_{incarc} \cdot \Delta t} \quad (5.13)$$

unde: I_{incarc} este curentul de încărcare; Δt este intervalul de timp în care este acționată α_{incarc}

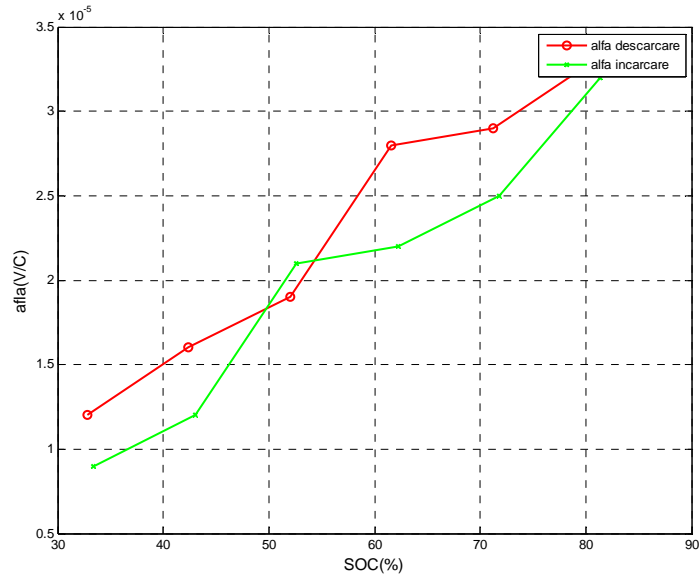


Fig. 5.20. Dinamica în timp real a parametrului α la descărcare și la încărcare

5.4.2.3. Componenta de polarizare în timpul perioadei de repaus

Conform rezultatelor prezentate anterior, la descărcare semnalul descrescător de tensiune determinat de efectul de polarizare al bateriei este aproximat cu o funcție exponențială.

Evoluția tranzitorie a recuperării tensiunii din momentul în care curentul de descărcare devine zero, poate fi de asemenea aproximat cu o funcție exponențială.

Un alt punct important al acestei lucrări este demonstrarea, prin date experimentale, că cele două funcții exponențiale, a tensiunii bateriei în timpul aplicării curentului și a evoluției tensiunii în perioada de repaus sunt similare (cu excepția semnului), fenomenele de difuzie și de polarizare au aceeași evoluție în timpul descărcării cât și după terminarea procesului, respectiv încărcare.

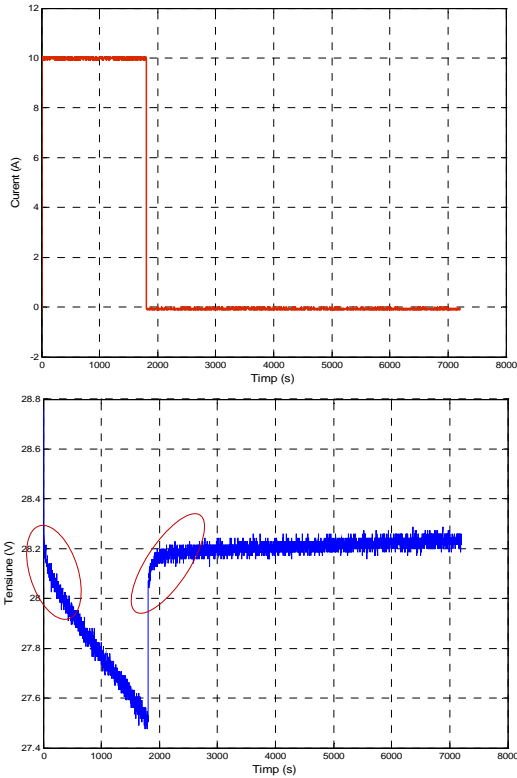


Fig. 5.21. Cele două zone de polarizare la descărcare și în perioada de repaus

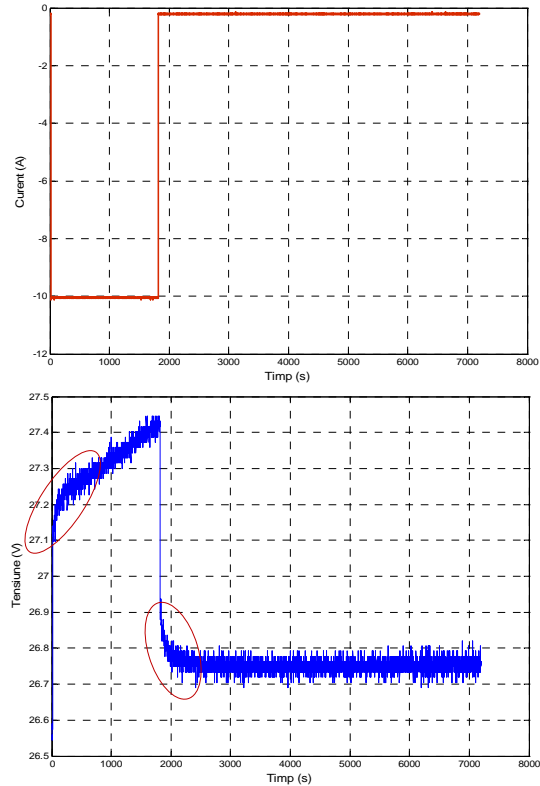


Fig. 5.22. Cele două zone de polarizare la încărcare și în perioada de repaus

- *Componenta de polarizare în timpul perioadei de repaus în urma unui test de descărcare*

În figura 5.23 se pot observa următoarele semnale:

- Semnalul descrescător de culoare roșie este tensiunea reală la bornele bateriei în timpul unui puls de descărcare din momentul începerii fenomenului de polarizare până în momentul în care curentul de descărcare devine zero;
- Dreapta punctată este componenta u_{ocv} definită la *Subpunctul 5.6.2* prin relația (5.4).

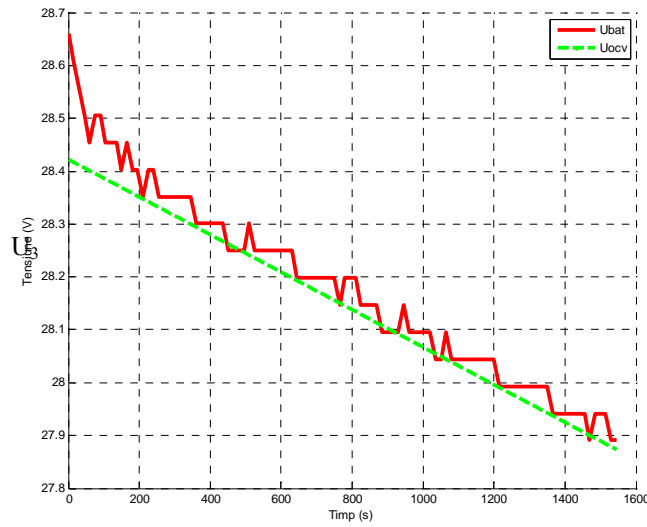


Fig. 5.23. Tensiunea la bornele bateriei la descărcare și componenta u_{ocv}

Se realizează diferența dintre componenta u_{OCV} și semnalul tensiunii la bornele bateriei notată u_{bat} (figura 5.24). Se obține un semnal crescător de formă asemănătoare cu cel al tensiunii la bornele bateriei în timpul perioadei de repaus (figura 5.24).

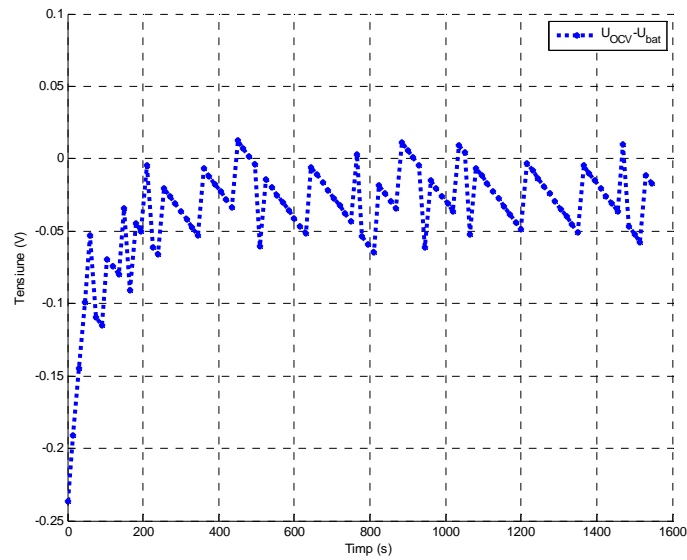


Fig. 5.24. Tensiunea rezultată din diferența $u_{ocv} - u_{bat}$

Semnalul rezultat din diferența $u_{ocv} - u_{bat}$ se adună cu valoarea U_2 și se suprapune peste semnalul de tensiune la bornele bateriei din timpul perioadei de repaus (figura 5.25). Se poate observa că cele două semnale au aceeași dinamică.

Semnalul $u_{rezultant}$ din figura 5.25 se calculează cu ajutorul relației (5.14).

$$u_{rezultant}(t) = u_{ocv}(t) - u_{bat}(t) + U_2 \quad (5.14)$$

unde:

- $u_{ocv}(t)$ este componenta tensiunii în circuit deschis;
- $u_{bat}(t)$ este tensiunea la bornele bateriei;
- U_2 este valoarea tensiunii la bornele bateriei în momentul începerii procesului de polarizare.

$$U_2 = U_1 - \Delta U_{R01} \quad (5.15)$$

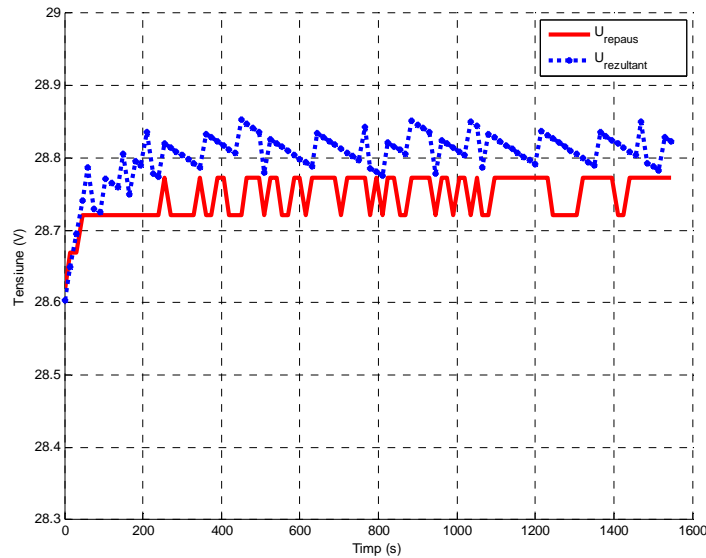


Fig. 5.25. Semnalele tensiunii rezultante $u_{rezultant}$ și a tensiunii de repaus u_{repaus}

Se poate estima cu ușurință în timp real valoarea tensiunii în circuit deschis de la sfârșitul perioadei de repaus prin utilizarea funcției exponențiale ce definește tensiunea de polarizare din timpul încărcării sau descărcării bateriei.

Această funcție se poate implementa în algoritmul de gestiune al energiei bateriei.

Astfel, nu mai este nevoie ca pentru stabilirea valorii tensiunii în circuit deschis după un test de încărcare/ descărcare, să se aplice o perioadă de repaus, fiind suficientă prelucrarea datelor obținute din timpul descărcării, respectiv încărcării.

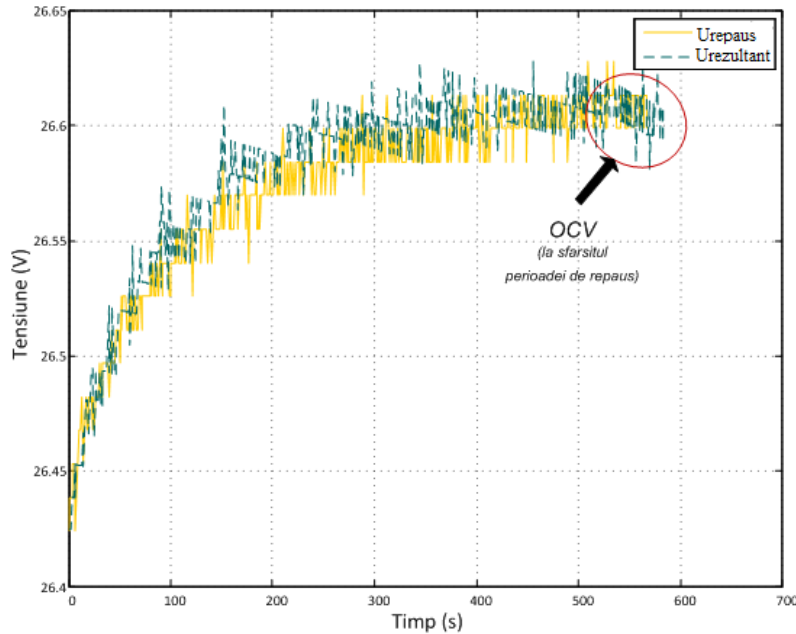


Fig. 5.26. Semnalele tensiunii rezultante $u_{rezultant}$ și a tensiunii de repaus u_{repaus}

Figura 5.26 prezintă semnalele tensiunii la bornele bateriei în timpul perioadei de repaus și a tensiunii rezultante $u_{rezultant}$ obținut prin metoda prezentată anterior. Semnalul de tensiune la borne u_{repaus} este un semnal obținut experimental. Acest semnal nu a fost filtrat.

Se poate observa cu ușurință din figura 5.26 că semnalul $u_{rezultant}$ urmărește semnalul de tensiune u_{repaus} , cele două semnale putând fi considerate echivalente.

În consecință se poate identifica valoarea tensiunii în circuit deschis OCV de la sfârșitul perioadei de repaus.

Similar se aplică aceeași metodă în cazul testelor de încărcare.

5.5. Funcțiile corespunzătoare comportamentului fiecărui parametru al bateriei implementat în model

Deoarece parametrii bateriei nu rămân constanți în timpul testelor de încărcare/ descărcare, este necesară găsirea funcției corespunzătoare fiecărui parametru.

Deoarece scopul este acela de a realiza un singur model care să simuleze comportamentul parametrilor bateriei atât la încărcare cât și la descărcare, datele utilizate în vederea obținerii funcțiilor reprezintă media dintre valorile extrase la încărcare și la descărcare.

Toate aceste date au fost calculate în funcție de *SOC* a bateriei.

Asupra bateriei este aplicat un curent de 10 A timp de 30 de minute după care urmează o perioadă de repaus de 30 de minute. Deoarece în cadrul unei aplicații, se recomandă ca bateria să funcționeze în domeniul 20% - 80% *SOC*, s-a ținut cont de aceste indicații.

Tabelul 5.3 prezintă parametrii bateriei R_0 , R_p , C_p , α în funcție de starea de încărcare a bateriei (*SOC*).

Tabel 5.3. Parametrii bateriei pentru diferite valori ale *SOC*

SOC (units)	R_0 (ohm)	R_p (ohm)	C_p (F)	α (V/C)
0.26	0.061	0.021	5802	0.000010
0.35	0.061	0.014	7656	0.000011
0.45	0.061	0.016	4487	0.000015
0.54	0.061	0.027	4104	0.000021
0.64	0.061	0.021	5855	0.000024
0.74	0.061	0.015	5792	0.000028
0.83	0.061	0.020	5656	0.000031

Astfel, cu excepția rezistenței interne serie R_0 ce se consideră constantă, comportamentul celorlalți parametri a fost aproximat printr-o funcție dependentă de *SOC* a bateriei.

Se consideră: $u = SOC$

5.5.1 Funcția corespunzătoare rezistenței interne R_0

R_0 care se consideră constantă.

5.5.2 Funcția corespunzătoare rezistenței de polarizare R_p

Datele din tabelul 5.3 sunt prelucrate cu ajutorul CfTool/ Matlab pentru a afla funcția corespunzătoare rezistenței de polarizare R_p . S-a determinat că funcția care reproduce cel mai bine comportamentul rezistenței de polarizare atât la descărcare cât și la încărcare este de tip Fourier. Astfel variabila dependentă este R_p și variabila independentă este *SOC*.

Funcția corespunzătoare este de tip Fourier, de forma:

$$R_p(u) = a_0 + a_1 \cos(u \cdot w) + b_1 \sin(u \cdot w) + a_2 \cos(2 \cdot u \cdot w) + b_2 \sin(2 \cdot u \cdot w) \quad (5.16)$$

În urma calculului, s-au obținut următorii parametri:

$$R_p(u) = 0.01892 - 0.0007238 \cdot \cos(1.001 \cdot u) - 0.003512 \cdot \sin(1.011 \cdot u) - 0.0024 \cdot \cos(2 \cdot u \cdot 1.011) + 0.004439 \cdot \sin(2 \cdot u \cdot 1.011)$$

Figura 2.27 prezintă răspunsul funcției obținute prin prelucrarea valorilor rezistenței de polarizare la diferite valori ale stării de încărcare a bateriei.

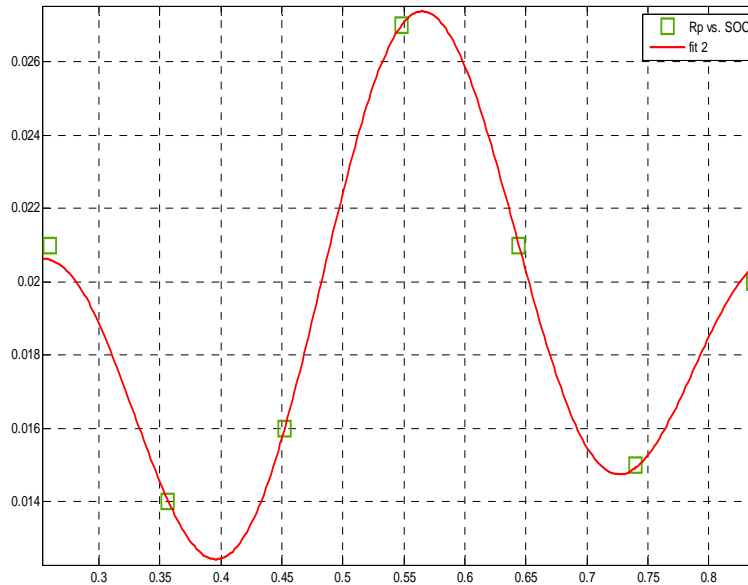


Fig. 5.27. Dinamica funcției corespunzătoare $R_p(SOC)$

5.5.3 Funcția corespunzătoare capacității de polarizare C_p

Caracteristica capacității de polarizare C_p poate fi observată în figura 5.28, funcția corespunzătoare fiind obținută de asemenea prin prelucrarea datelor cu CfTool/ Matlab. Funcția al cărei răspuns este capabil să redea cu eroare foarte mică comportamentul capacității de polarizare, este de tip Fourier. Variabila dependentă este C_p și variabilă independentă este SOC .

Tipul funcției corespunzătoare este Fourier:

$$C_p(u) = a_0 + a_1 \cos(u \cdot w) + b_1 \sin(u \cdot w) + a_2 \cos(2 \cdot u \cdot w) + b_2 \sin(2 \cdot u \cdot w) \quad (5.17)$$

În urma calculului, s-au obținut următoarea funcție:

$$C_p(u) = 5598 - 966.6 \cdot \cos(u \cdot 10.61) + 281.7 \cdot \sin(u \cdot 10.61) + 303.1 \cdot \cos(2 \cdot u \cdot 10.61) + 1167 \cdot \sin(2 \cdot u \cdot 10.61)$$

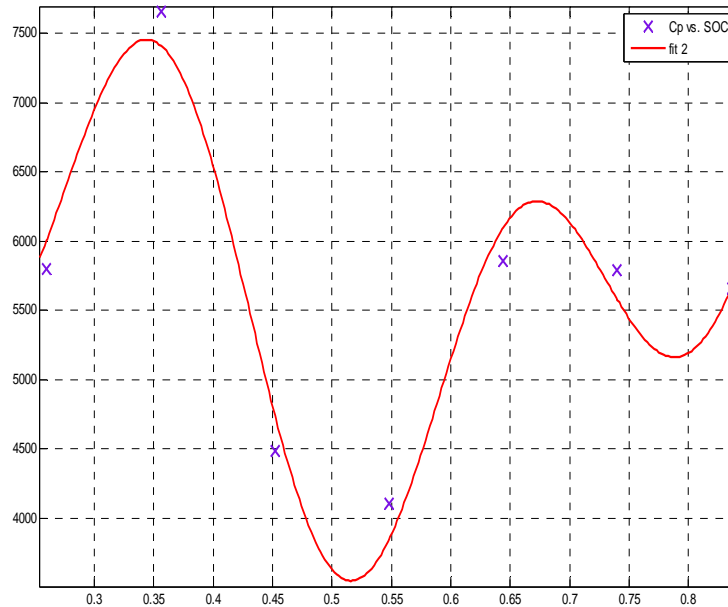


Fig. 5.28. Dinamica funcției corespunzătoare $C_p(SOC)$

5.5.4 Funcția corespunzătoare parametrului α

Funcția corespunzătoare lui α a fost găsită utilizând programul Statgraphics:

Variabila dependentă este α iar variabila independentă este reprezentată de SOC ca și în cazul funcțiilor precedente.

Funcția corespunzătoare este de tip liniar:

$$\alpha(u) = a + b \cdot u \quad (5.18)$$

Rezultatul obținut este:

$$\alpha(u) = -0.00000161012 + 0.0000394345 \cdot u$$

Statistica R-Pătrat indică că funcția obținută ajustează modelul în proporție de 98.3543%, rezultatul fiind deci foarte bun. Coeficientul de corelație este egal cu 0.991738 indicând o relație extrem de puternică între cei doi parametri.

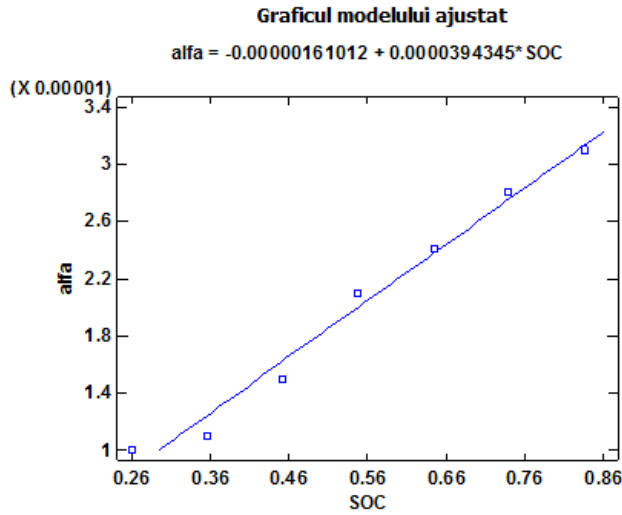


Fig. 5.29. Graficul modelului ajustat corespunzător funcției $\alpha(u)$

5.5.5 Funcția corespunzătoare tensiunii în circuit deschis

Variabilă dependentă este tensiunea în circuit deschis (OCV) și variabila independentă este SOC .

Tipul funcției corespunzătoare este un polinom de gradul doi:

$$OCV(u) = a + b \cdot u + c \cdot u^2 \quad (5.19)$$

Rezultatul este:

$$OCV(u) = 25.7919 + 0.00675057 \cdot u + 0.000289028 \cdot u^2$$

Statistica R-Pătrat indică că funcția obținută ajustează modelul în proporție de 99.4205%.

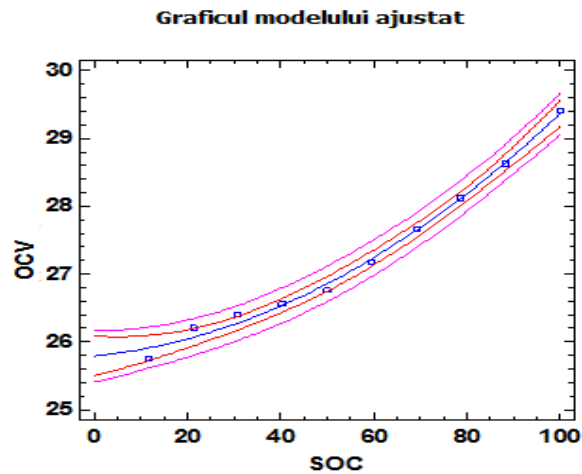


Fig. 5.30. Graficul modelului ajustat corespunzător funcției $OCV(u)$

5.6. Estimarea în timp real a *SOC* a bateriei *Li-Ion* utilizând tensiunea la borne a bateriei.

În acest paragraf este propusă o nouă metodă de estimare a *SOC* a bateriei *Li-Ion* utilizând valorile măsurate în timp real a tensiunii la borne pe parcursul testelor de încărcare și descărcare [VONR 12]. Așa cum am precizat anterior, *SOC* a bateriei este un parametru important, identificarea corectă a acestuia fiind o condiție obligatorie pentru un sistem precis de management al bateriei. Este explicabilă importanța sa la vehiculele electrice, unde informații precise despre capacitatea rămasă sunt utilizate de către *BMS* (Sistemul de management al bateriei) și sistemul de control în luarea deciziilor.

Estimarea stării de încărcare a bateriei *Li-Ion* pe baza măsurării în timp real a bateriei la borne are o importanță deosebită deoarece poate fi utilizată în aplicații cu autovehicule.

În afară de testele realizate pe bateria prezentată anterior, s-au efectuat teste pe o baterie similară din punctul de vedere al tehnologiei utilizate, având aceleași caracteristici și structura însă cu o capacitate mai mică, de 48 Ah, denumită 7s8p MP176065 INT SW002.

Au fost realizate teste de *SOC* în aceleași condiții ca cele aplicate bateriei 7s8p MP176065 INT SW001.

Caracteristica superioară este corespunzătoare testului de încărcare iar cea inferioară este corespunzătoare probei de descărcare.

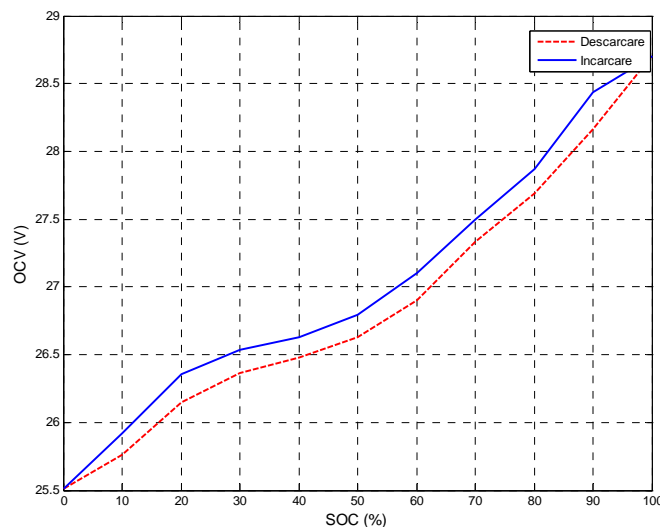


Fig. 5.31. Caracteristica *SOC* a bateriei 7s8p MP176065 INT SW002

În figura 5.32 sunt prezentate caracteristicile tensiunii în circuit deschis (OCV) și a tensiunii la bornele bateriei în timpul testului de descărcare (U_{bat}). Se poate observa cu ușurință dinamica similară a celor doi parametri în funcție de SOC a bateriei, în principal în intervalul de SOC 20 % - 100 %, care de fapt este intervalul de funcționare a bateriei.

Luând în considerare aceste rezultate, putem afirma că tensiunea la bornele bateriei în timpul proceselor de descărcare și încărcare, este influențată de starea de încărcare în aceeași manieră ca și tensiunea în circuit deschis.

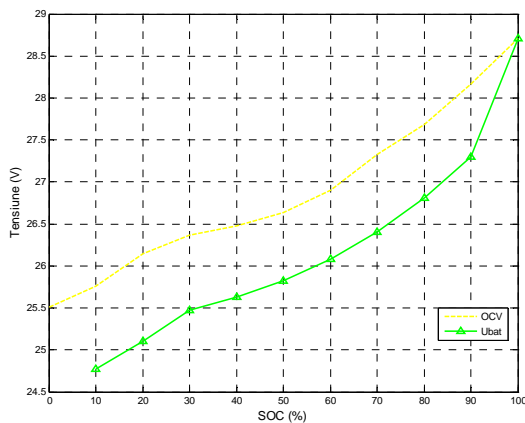


Fig. 5.32. Caracteristicile OCV și U_{bat} în funcție de SOC la descărcare

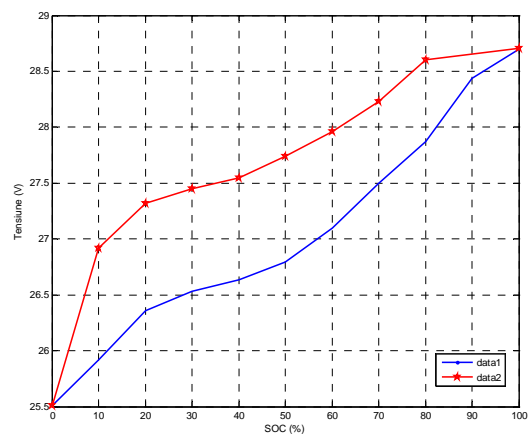


Fig. 5.33. Caracteristicile OCV și U_{bat} în funcție de SOC la încărcare

Astfel funcțiile capabile să reproducă comportamentul SOC la încărcare și la descărcare în funcție de U_{bat} sunt calculate în vederea implementării lor în modelul bateriei.

- **la descărcare**

Funcția corespunzătoare comportamentului $SOC(U_{bat})$ la descărcare cu cele mai bune rezultate este de forma unui polinom de gradul 2, statistica R-Pătrat indicând că metoda ajustează modelul cu 98.18 % variația lui SOC , fiind un rezultat foarte bun.

Ecuția obținută este:

$$SOC_{desc}(U_{bat}) = p_1 \cdot (U_{bat}^2) + p_2 \cdot U_{bat} + p_3 \quad (5.20)$$

unde:

$$p_1 = -5.663; \quad p_2 = 331.1; \quad p_3 = -4724.$$

- **la încărcare**

În aceeași manieră sunt analizate și datele obținute la testul de încărcare. Funcția corespunzătoare comportamentului $SOC(U_{bat})$ la încărcare cu cele mai bune rezultate este de forma unui polinom de gradul 2, statistica R-Pătrat indicând că metoda ajustează modelul cu 99.61 % variația lui SOC , rezultatul aproximând mai bine decât în cazul descărcării.

Ecuția obținută este:

$$SOC_{incarc}(U_{bat}) = p_1 \cdot (U_{bat}^2) + p_2 \cdot U_{bat} + p_3 \quad (5.21)$$

unde:

$$p_1 = 25.52; p_2 = 1473; p_3 = -2.116e + 004.$$

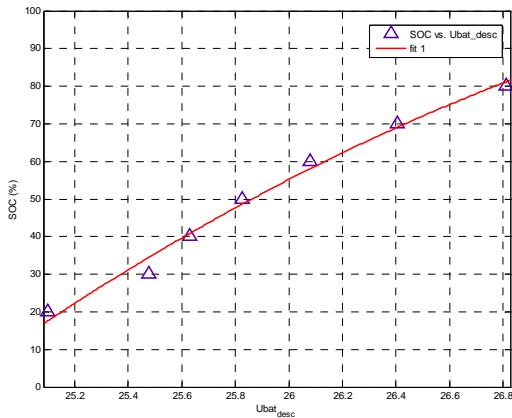


Fig. 5.34. Modelul ajustat prin dat de funcția $SOC(U_{bat})$ descărcare

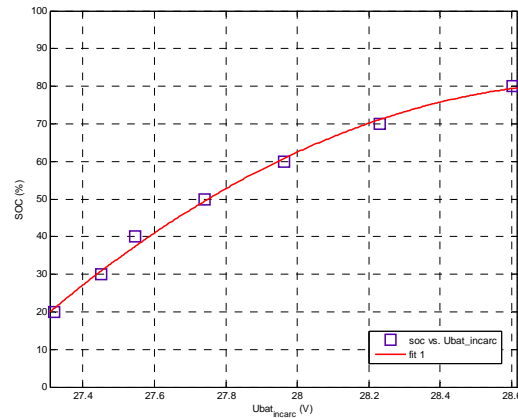


Fig. 5.35. Modelul ajustat prin dat de funcția $SOC(U_{bat})$ descărcare

Din rezultatele obținute, se poate observa că cele două funcții definite de relațiile (5.20) și (5.21) sunt capabile să reproducă cu acuratețe dependența SOC a bateriei de U_{bat} în timpul încărcării și descărcării.

Capitolul 6

Simulare baterie Li-Ion integrată pe un vehicul electric

6.1. Simulare model baterie Li-Ion în Matlab/ Simulink

Modelul bateriei este simulat cu ajutorul programului de simulare Matlab / Simulink și este alcătuit din trei subsisteme corespunzătoare componentelor modelului prezentate în prima parte a acestui capitol: variația tensiunii în circuit deschis, căderea ohmică de tensiune și circuitul RC corespunzător fenomenului de polarizare ce are loc în interiorul bateriei.

Rezultatele simulării (răspunsului tensiunii bateriei) sunt prezentate și comparate cu răspunsul real al bateriei a bateriei în urma testelor realizate în laborator.

Se poate observa că modelul utilizat este capabil să simuleze cu acuratețe semnalul de tensiune atât la încărcare cât și la descărcare.

Figura următoare prezintă modelul bateriei, alcătuit din subsistemele ce calculează calculul tensiunii bateriei și al SOC.

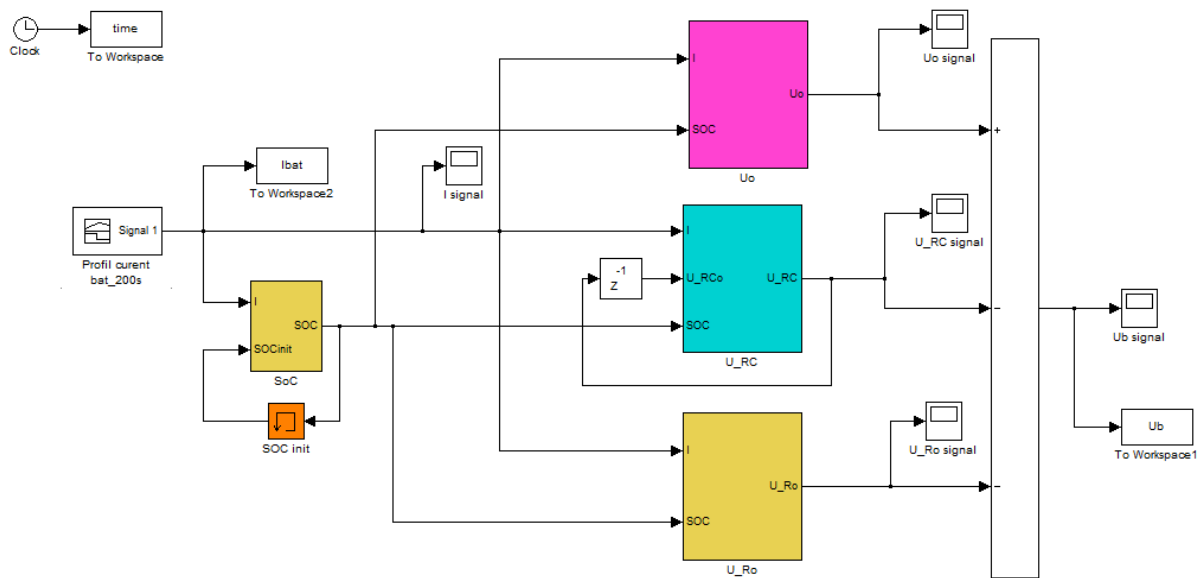


Fig. 6.1. Model baterie Li-Ion

- Blocul ce calculează *SOC* al bateriei se bazează pe următoarea ecuație:

$$SOC_t(\%) = SOC_{t-1} \pm \frac{\eta}{C_n} \cdot \int_{t-1}^t I(t)dt \cdot 100 \quad (6.1)$$

Ecuția ia în considerare starea de încărcare la momentul precedent și randamentul bateriei, unde:

- *SOC*- starea de încărcare a bateriei [%];
- C_n - capacitatea nominală a bateriei [Ah];
- *I*- curentul de descărcare/ încărcare [A];
- η - randamentul bateriei [%];

Dacă modelului bateriei i se aplică un curent constant de descărcare de 10 A (figura 6.2), răspunsul în tensiune a bateriei va fi cel prezentat în figura 6.2.

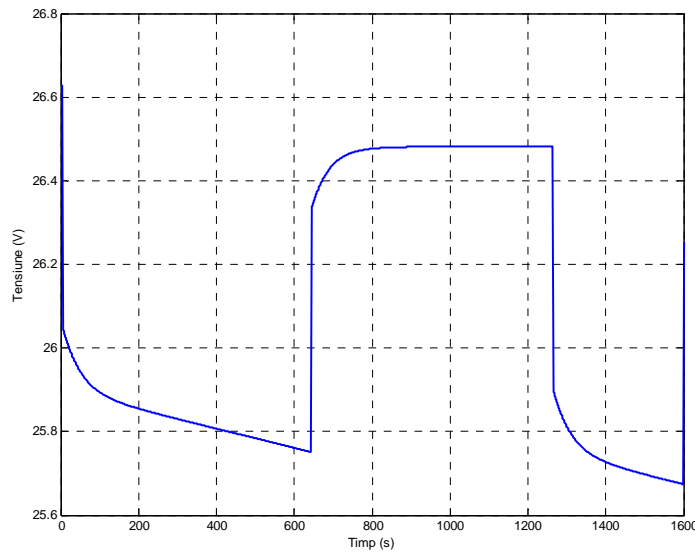


Fig. 6.2. Răspunsul modelului bateriei la aplicarea unui curent de descărcare de 10 A

6.2. Validare model baterie Li-Ion 7s8p MP176065 INT SW001

Pentru a valida experimental modelul simulat se aplică modelului diferite profiluri de curent. Aceste profiluri de curent sunt aplicate de asemenea și asupra bateriei reale, datele experimentale fiind comparate cu cele simulate.

6.2.1. Descărcare în trepte prin aplicarea unui curent de 10 A

Asupra bateriei se aplică un profil de curent de descărcare în trepte cu un curent de 10 A (figura 6.3). Starea de încărcare inițială a bateriei este de 85 %.

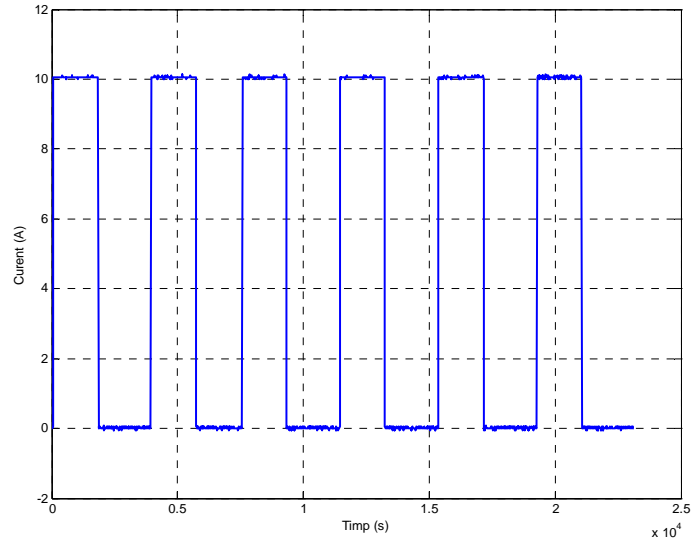


Fig. 6.3. Profil curent de descărcare aplicat bateriei

În figura 6.4 se poate observa că semnalul simulat prin intermediul modelului urmărește comportamentul tensiunii reale a bateriei la bornele acesteia în timpul unui proces de descărcare cu un curent constant de 10 A

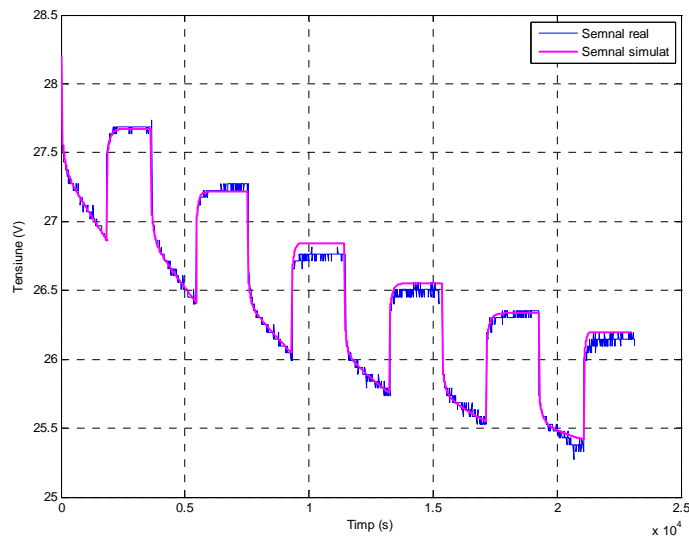


Fig. 6.4. Dinamica tensiunii reale și a celei simulate la descărcarea bateriei

6.2.2. Descărcare și încărcare în trepte, pe o perioadă de 200 s

Aplicarea unui profil de încărcare / descărcare a bateriei pentru o durată scurtă de timp de 200 s. Forma curentului aplicat poate fi observată în figura 6.5.

În momentul aplicării curentului, *SOC* a bateriei are o valoare de 47.22 %.

Acest profil este unul dificil deoarece fiecare puls de curent are o perioadă de 20 s, cu toate acestea modelul bateriei este capabil să reproducă cu erori foarte mici semnalul real așa cum se poate observa din figura 6.6.

În intervalul de timp 50 s - 100 s, semnalul simulat nu este capabil să urmărească tensiunea reală a bateriei, diferența dintre cele două semnale fiind vizibilă. Acest rezultat este o consecință a faptului că parametrii bateriei implementați în model sunt calculați pentru *SOC* ce ia valori între 25 % și 85 %, zona în care modelul prezintă erori, descărcarea se face sub 25 % *SOC*, bateria fiind aproape descărcată.

În pofida erorii, faptul că sub 25 % *SOC* semnalul simulat este capabil să urmeze comportamentul real al bateriei, demonstrează că modelul este bine conceput, identificarea parametrilor realizându-se cu exactitate.

De asemenea este important de evidențiat performanța bateriei reale de tehnologie *Li-Ion*, ea fiind capabilă să răspundă cerințelor utilizatorului chiar și în condițiile unui nivel al *SOC* sub cel indicat de producător.

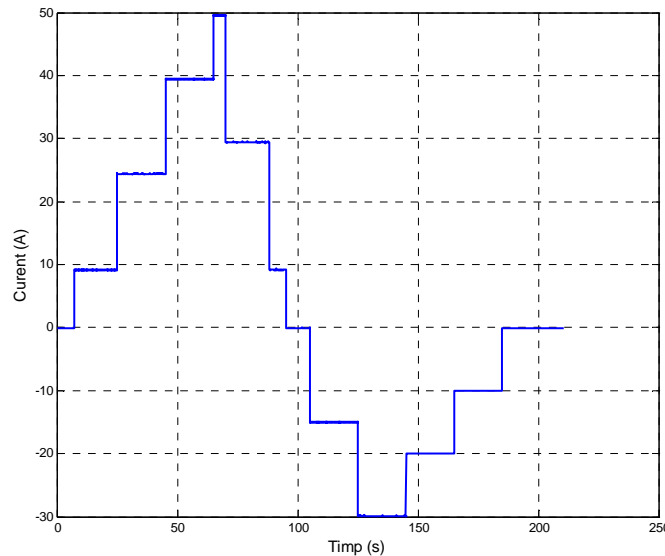


Fig. 6.5. Profil curent de descărcare aplicat bateriei

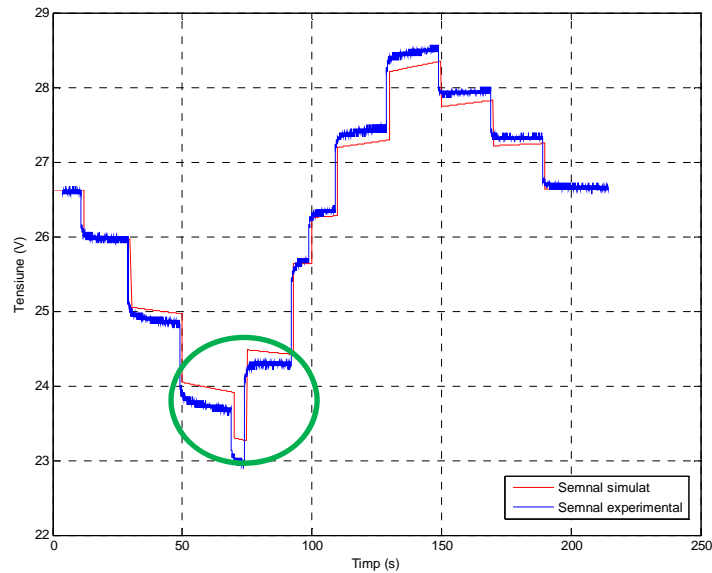


Fig. 6.6. Comparație date experimentale și simulate pentru profil curent de 200 de secunde

6.3. Simulare model vehicul electric realizat în Matlab/ Simulink

6.3.1. Instalație utilizată la simulare

Simularea vehiculului se realizează cu ajutorul echipamentului programabil sarcină electronică de curent continuu (Chroma) și a sursei de curent continuu (Sorensen), ambele putând fi controlate prin intermediul programului Dspace.

Echipamentul Chroma se comporta ca un receptor ce absoarbe energia produsă de baterie, în timp ce echipamentul Sorensen poate genera putere pe care sistemul de celule *Li-Ion* o absoarbe în regim de frână recuperativă, acest regim fiind important deoarece el survine la funcționarea vehiculelor electrice.

Avantajele acestui simulator sunt costul care este destul de mic în comparație cu alte simulatoare de vehicule electrice, și complexitatea scăzută. De asemenea, la acest simulator în funcție de topologia aleasă pentru vehiculul electric, se pot adăuga cu ușurință și alte sisteme de stocare cum ar fi supercapacitoare sau pile de combustie, sau chiar transformarea sa într-un simulator de vehicul hibrid.

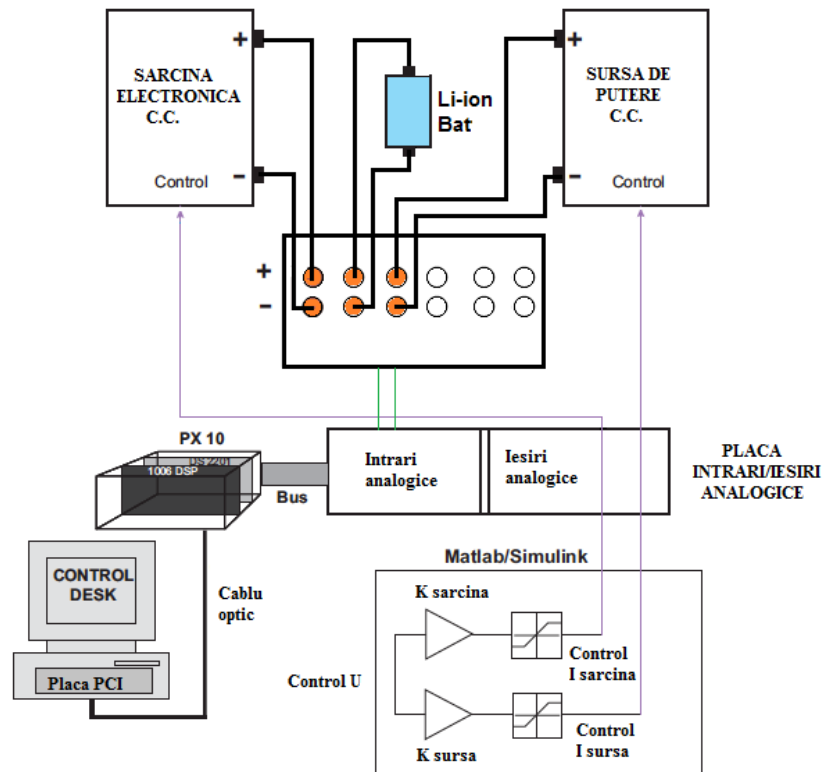


Fig. 6.7. Instalație simulator vehicul electric, parte hardware și software

Platforma în timp real este compusă din dSpace Modular Hardware format dintr-o cutie de conexiuni PX10, procesor de semnal digital DSP DS 1006 care comunică cu computerul printr-un cablu optic și o placa PCI.

Programul dSpace ControlDesk asigură accesul la platforma simulată și la rețeaua de conectare, fiind capabil să realizeze măsurători, calibrări și diagnosticare, având o structură flexibilă și modulară ce oferă scalabilitate mare răspunzând cerințelor diferitelor tipuri de aplicații.

6.3.2. Simulare vehicul electric

Figura 6.8 prezintă aplicația realizată în Matlab/ Simulink ce simulează vehiculul electric, subsistemele pentru forțele de rezistență, randamentul motorului, puterea acestuia și subsistemul baterie *Li-Ion*.

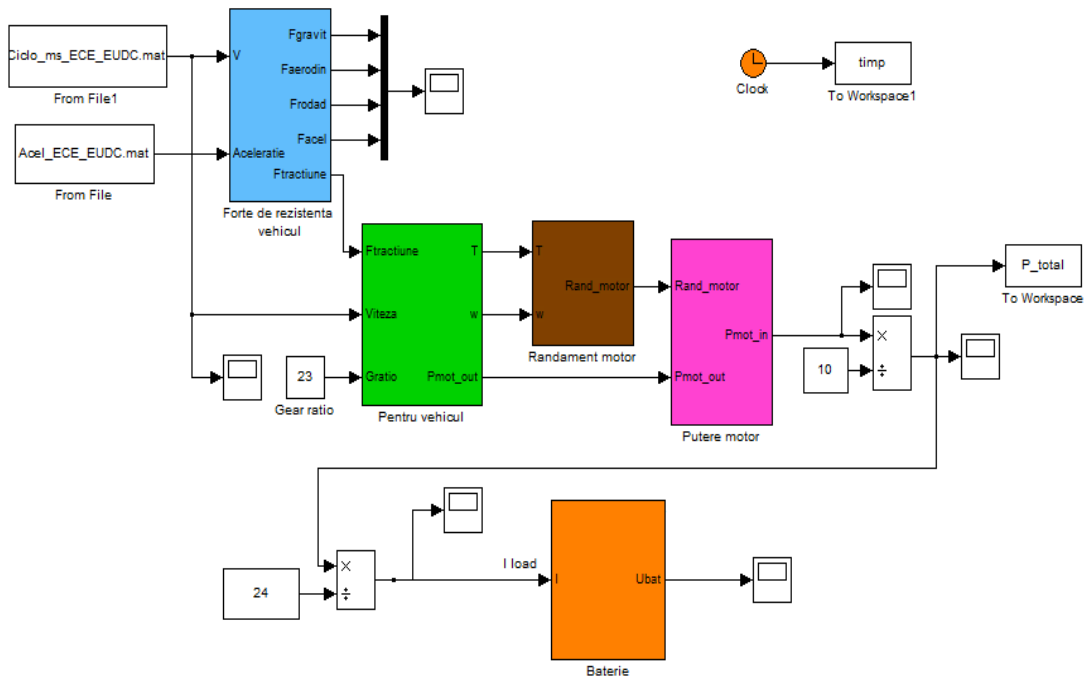


Fig. 6.8. Simulare vehicul electric in Matlab/ Simulink

6.3.3. Validare model simulat

Un ciclu de conducere este reprezentat de caracteristica viteză vehicul în funcție de timp.

Este utilizat noul ciclu de conducere european (NEDC). Acesta este simulat pe o perioadă de 1225 s și constă în patru cicluri de conducere ECE-15 consecutive și un ciclu de conducere extra urban (EUDC), viteza maximă a vehiculului fiind de 120 Km/h. Ciclul de conducere ECE-15 reproduce condițiile de trafic la care este supus un vehicul în marile orașe și se caracterizează prin viteză mică a vehiculului, sarcină scăzută la motor. Ciclul de conducere EUDC este mai agresiv și viteza vehiculului este mai mare. Acest ciclu de conducere este utilizat în spațiul european în vederea certificării vehiculelor ușoare din punctul de vedere al emisiilor.

Prin ciclul de conducere european se dorește reprezentarea unui ciclu de conducere tipic a unui vehicul in Europa, fiind utilizat de asemenea cu scopul de a calcula nivelul emisiilor de gaze a unui vehicul.

Utilizând acest ciclu de conducere se obține puterea necesară pe care sistemul de stocare al energiei electrice, în cazul nostru bateria *Li-Ion* să fie capabilă să o furnizeze în vederea funcționării optime a vehiculului. Acest profil de putere se aplică simulatorului HIL prin

intermediul programului Matlab/ Simulink. Figura 6.9 prezintă profilul de curent ce se aplică bateriei *Li-Ion* în vederea obținerii unui regim de funcționare similar celui de pe vehicul.

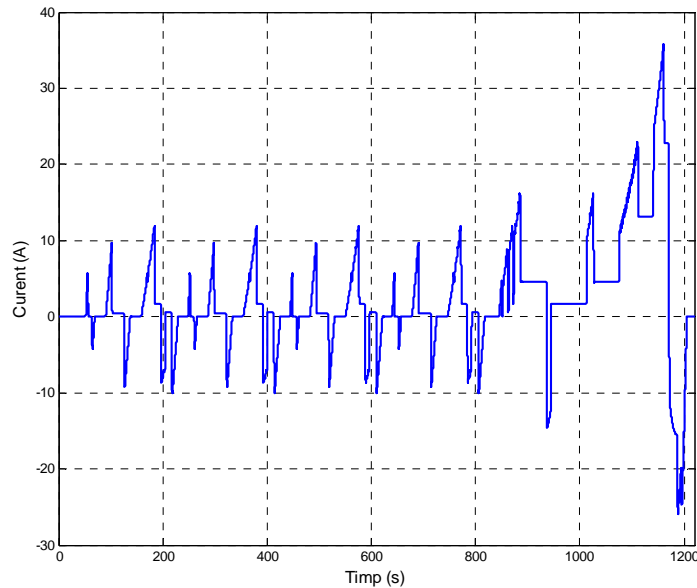


Fig. 6.9. Curentul ce se aplică bateriei corespunzător ciclului de conducere european NEDC pentru un vehicul

Figura 6.10 prezintă caracteristica tensiunii reale la bornele bateriei *Li-Ion* în urma simulării unui ciclu de conducere european NEDC cu ajutorul simulatorului HIL și răspunsul simulării a modelului vehiculului electric realizat în Matlab/ Simulink. Modelul vehiculului cuprinde în structura sa și modelul simulat al bateriei *Li-Ion*.

Rezultatele obținute demonstrează că modelul realizat pentru bateria *Li-Ion* este capabil să simuleze comportamentul real al tensiunii acesteia pentru diferite teste aplicate. Astfel, modelul bateriei *Li-Ion* implementat cu ajutorul mediului de programare Matlab / Simulink utilizează o nouă metodă de calcul a parametrilor bateriei și introduce în structura sa parametrul α , în urma analizării rezultatelor stabilindu-se o bună corelație între datele obținute prin simulare și datele măsurate direct de la bateria *Li-Ion*.

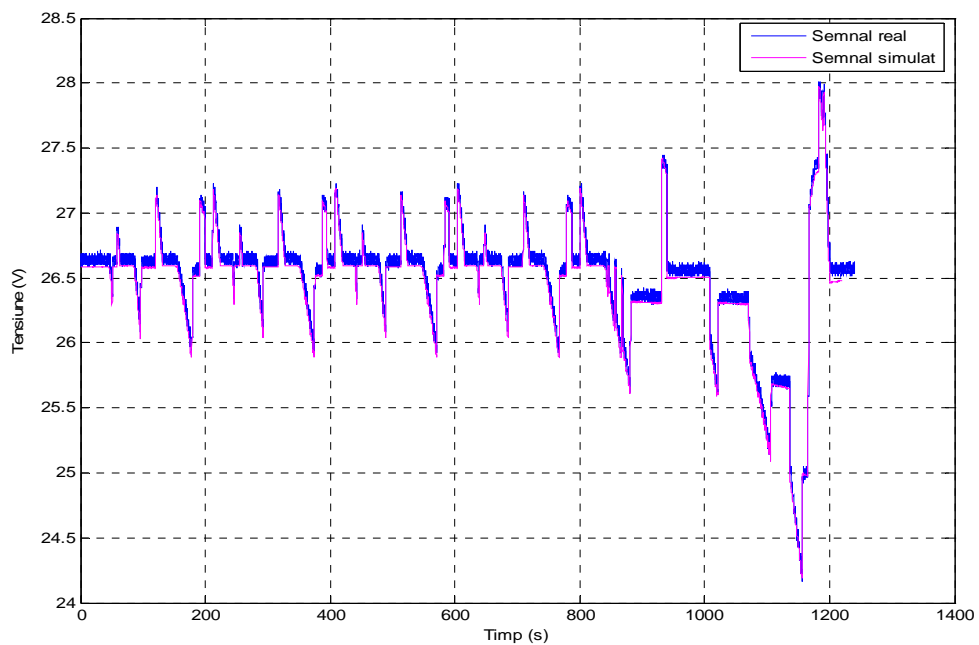


Fig. 6.10. Semnal real și simulat al bateriei la aplicarea unui ciclu de conducere european NEDC pentru un vehicul

Capitolul 7

Concluzii generale și contribuții personale

7.1. Concluzii generale

În cadrul acestei teze s-a realizat o analiză a comportamentului sistemelor de stocare a energiei electrice, abordându-se problematica identificării parametrilor bateriilor de tehnologie *Li-Ion* utilizate pe vehicule verzi.

Obiectivul urmărit a fost acela de a concepe un model cât mai simplu capabil să simuleze cu precizie comportamentul bateriei *Li-Ion* în vederea integrării lui în structura unui vehicul electric.

În **Capitolul 2** este realizat un studiu cu privire la situația actuală a mediului înconjurător afectată de emisiile de gaze cu efect de seră, transportul auto fiind pe locul trei în clasamentul sectoarele poluante. În acest context, industria vehiculelor verzi reprezintă o soluție pentru diminuarea emisiilor poluate, fiind susținută de marile guverne ale lumii prin adoptarea de măsuri ce stimulează piața automobilelor eco și încercă descurajarea utilizării vehiculelor convenționale.

Principalele soluții oferite de producătorii auto sunt vehiculele hibride, plug-in și electrice. Având emisii zero, vehiculul electric reprezintă un răspuns la gravele probleme de mediu, limitările pe care însă trebuie să le învingă pentru a fi considerat un produs de succes, vizează în primul rând sistemul de stocare a energiei electrice.

Principalele sisteme de stocare a energiei electrice utilizate pe vehicule prietenoase cu mediul sunt prezentate în **Capitolul 2**, fiind clasificate în funcție de tehnologiile existente și realizându-se o comparație a principalelor lor caracteristici funcționale.

Bateriile reîncărcabile de tehnologie *Li-Ion* sunt la ora actuală, în topul preferințelor producătorilor de echipamente portabile dar și auto, datorită caracteristicilor foarte bune: tensiune mare de funcționare, densitate masică de energie mare, rată mică de autodescărcare precum și durată mare de funcționare. Structura unei celule *Li-Ion* și principiul de funcționare al

acesteia sunt descrise în **Capitolul 3**, fiind enumerați parametrii bateriilor și principalele lor caracteristici.

În **Capitolul 4** sunt descrise diferitele modele propuse în literatura de specialitate pentru bateriile *Li-Ion*.

Modelarea în domeniul frecvență ia în considerare procesele chimice ce au loc în interiorul bateriei în timpul funcționării și se bazează pe măsurarea impedanței electrochimice. Această metodă este utilizată în special de către chimiști, modelele rezultate fiind complexe și dificil de implementat. În cadrul acestei cercetări s-au realizat asupra bateriei *Li-Ion* teste de spectroscopie de impedanță electrochimică de tip galvanostatic. S-a utilizat un model consacrat al bateriei în vederea implementării datelor obținute. S-au efectuat simulări utilizând programul ZView și s-a stabilit că identificarea parametrilor bateriei nu s-a făcut cu exactitate, existând erori. Este dificilă modelarea cu precizie prin intermediul circuitelor echivalente a proceselor ce apar în interiorul bateriei în timpul funcționării.

În cadrul acestui capitol se propune un nou model matematic foarte simplu care descrie comportarea dinamică a bateriei *Li-Ion*, bazat pe modelul Thevenin. Noutatea constă în introducerea unui nou parametru notat α , în ecuația tensiunii la bornele bateriei. Acest parametru α , reprezintă variația tensiunii la borne cu capacitatea bateriei extrasă sau adăugată pe parcursul testelor.

Capitolul 5 abordează problema identificării parametrilor bateriei *Li-Ion*. Instalația de probe și bateria *Li-Ion* testată în laborator sunt descrise amănunțit. Bateria studiată este un sistem complex de 56 de celule *Li-Ion* identice cu o configurație de patru blocuri în paralel, fiecare bloc fiind realizat din două rețele în paralel de câte șapte celule în serie.

Au fost necesare teste de încărcare și descărcare în vederea stabilirii valorii capacității acesteia, metodei corecte de încărcare a bateriei și a setărilor optime în vederea obținerii unor rezultate corecte. Un parametru extrem de important al bateriei este starea de încărcare, el furnizând informații cu privire la cantitatea de sarcină electrică existentă în baterie la un anumit moment de timp. Metoda utilizată pentru determinarea stării de încărcare a bateriei se bazează pe măsurarea tensiunii în circuit deschis.

În cadrul acestei teze este propusă o nouă metodă de identificare a parametrilor bateriei atât pentru încărcare cât și pentru descărcare. Răspunsul în tensiune al bateriei în timpul aplicării unui semnal de curent este reprezentat ca o sumă de doi termeni, unul influențat de evoluția în

timp a stării de încărcare a bateriei, celălalt termen fiind relaționat cu procesele de difuzie și polarizare ce au loc în interiorul bateriei. Identificarea se realizează cu ajutorul mediului de programare Matlab/ Simulink, etapele și rezultatele obținute fiind prezentate în cadrul acestui capitol. Astfel, s-au obținut funcțiile capabile să reproducă comportamentul celor două componente ale semnalului de tensiune la bornele bateriei. Componenta influențată de procesul de polarizare este reprezentată matematic de o funcție exponențială iar cea influențată de starea de încărcare a bateriei fiind reprezentată de ecuația unei drepte. Parametrii bateriei sunt identificați fiind analizat comportamentul lor în funcție de starea de încărcare a bateriei pe parcursul testelor.

În urma analizării rezultatelor s-a putut demonstra că evoluția tensiunii bateriei din timpul perioadei de relaxare poate fi aflată procesând semnalul de tensiune din timpul încărcării / descărcării.

Evoluția tensiunii în perioada de repaus când curentul aplicat bateriei devine zero, este aproximată de o funcție exponențială ca și în cazul semnalului tensiunii când curentul este diferit de zero. Este foarte important deoarece se pot realiza funcții predictive capabile să calculeze valoarea tensiunii la sfârșitul perioadei de relaxare utilizând datele obținute în timp real din momentul aplicării unui curent asupra bateriei.

Metoda utilizată inițial de determinare a stării de încărcare se bazează pe măsurarea tensiunii în circuit deschis a bateriei. Tot în cadrul *Capitolului 5* se propune o nouă metodă de estimare a stării de încărcare a bateriei *Li-Ion* utilizând tensiunea măsurată în timp real la bornele bateriei.

În **Capitolul 6** este descris întregul proces de simulare a modelelor bateriei și a vehiculului pe care este integrat. Cele două modele au fost simulate cu ajutorul mediului de programare Matlab/ Simulink. În modelul bateriei sunt implementate funcțiile corespunzătoare fiecărui parametru al bateriei, funcții calculate în *Capitolul 5*.

Datele obținute prin simulare sunt comparate cu rezultatele testelor experimentale, modelul bateriei fiind validat.

7.2. Contribuții personale

În Capitolul 2:

- Este prezentată o sinteză a efectelor dezvoltării industriei auto asupra mediului, impactul negativ al autovehiculelor convenționale, soluțiile existente și măsurile liderilor europeni în vederea sprijinirii vehiculelor prietenoase cu mediul.
- S-a realizat o statistică referitoare la producția autovehicule în România, evoluția prețului combustibilului și eforturile autorităților în vederea integrării vehiculelor verzi pe piața auto românească.
- S-a realizat o sinteză a principalelor sisteme de stocare a energiei integrate pe vehicule autonome, privind variantele existente și compararea performanțelor acestora.

În Capitolul 3:

- Sistematizarea informațiilor privind parametrii esențiali ai bateriei *Li-Ion* precum și caracteristicile principale ale acestor sisteme de stocare a energiei.

În Capitolul 4:

- Obținerea unui nou model pentru bateria *Li-Ion* în domeniul timp, bazat pe circuite electrice.
- Este introdus un nou parametru notat α în ecuațiile matematice ale circuitului echivalent.
- Impedanța caracteristică raportată a bateriei (α) demonstrează existența unei componente a tensiunii la bornele bateriei influențată de cantitatea de Ah extrași sau adăugați pe parcursul testelor. În urma comparării datelor experimentale cu cele rezultate în urma simulărilor, s-a demonstrat că parametrul α este util și a fost corect ales.

În Capitolul 5:

- S-a elaborat o nouă metodă de identificare a parametrilor bateriei ce se bazează pe descompunerea semnalului de tensiune, din momentul începerii procesului de polarizare, în două componente care depind de starea de încărcare a bateriei și de procesul de polarizare.
- S-a dovedit necesitatea introducerii și utilitatea parametrului α și s-a prezentat o a doua metodă de calcul a acestuia.

- S-a identificat tipul funcției corespunzătoare fiecărui parametru al bateriei atât în timpul descărcării cât și în timpul încărcării.
- S-au calculat coeficienții acestor funcții. S-a demonstrat prin compararea datelor reale și simulate că aceste funcții sunt capabile să reproducă cu acuratețe comportamentul fiecărui parametru al bateriei în funcție de starea de încărcare a acesteia.
- Parametrii bateriei s-au calculat, fiind prezentată evoluția lor pe parcursul testelor de încărcare și descărcare în funcție de starea de încărcare a bateriei.
- Prin analizarea datelor experimentale s-a demonstrat că în urma aplicării unui curent asupra bateriei, tensiunea în circuit deschis din timpul perioadei de repaus are un comportament similar cu cel al tensiunii din timpul aplicării curentului, caracteristica sa putând fi obținută din prelucrarea datelor obținute în timp real.
- S-a demonstrat evoluția similară a tensiunii în circuit deschis și a tensiunii la bornele bateriei în timpul proceselor de descărcare/ încărcare. Pe baza acestor rezultate s-a propus o nouă metodă de estimare a stării de încărcare a bateriei în timp real.

În Capitolul 6:

- S-a elaborat modelul de simulare pentru bateria *Li-Ion* în care s-au implementat funcțiile parametrilor acesteia identificate în *Capitolul 5*.
- S-a realizat modelul unui vehicul electric în care s-a integrat modelul sistemului de stocare bazat pe bateria *Li-Ion*.
- S-a validat modelul bateriei *Li-Ion* prin compararea datelor simulate cu datele obținute pe cale experimentală;
- În urma analizării rezultatelor s-a putut concluziona că metoda de identificare propusă este o metodă precisă și nu este foarte elaborioasă. Pe baza acestei metode se pot identifica parametrii bateriei și analiza dinamica acestora în timpul funcționării sistemului. Funcțiile dependente de starea de încărcare a bateriei redau cu precizie comportamentul parametrilor și se pot implementa cu ușurința în modelul bateriei.
- Modelul bateriei s-a bazat pe relațiile matematice expuse în *Capitolul 5* și s-a realizat în mediul de programare Matlab/ Simulink.

- În urma rezultatelor obținute, s-a demonstrat că modelul bateriei este bine realizat, el fiind integrat în modelul vehiculului și răspunzând cerințelor consumatorului. De asemenea modelul bateriei dovedește că bateria de tehnologie *Li-Ion* este capabilă să răspundă cerințelor consumatorilor, că este indicată în utilizarea pe vehicule electrice cu condiția să beneficieze un sistem de management al energiei performant.

7.3. Diseminarea rezultatelor

1. **E. Voncila**, I. Voncila, G. Fetecau, Real time state of charge estimation of lithium ion battery integrated on electric vehicles, International Conference UNITECH 2012, 16 – 17 Noiembrie 2012, Gabrovo, Bulgaria.
2. I. Voncila, **E. Voncila**, R. Buhosu, Functional stability analysis of all traction motor - energy storage system on autonomous hybrid vehicles, International Conference EV 2012, 4-5 octombrie 2012, Bucuresti, Romania.
3. I. Voncila, **E. Voncila**, R. Buhosu, Optimizarea geometrică a motoarelor electrice, de pe vehiculele autonome, pe criterii energetice, Conferinta nationala 2012, Suceava, 4-5 octombrie, Romania.
4. I. Voncila, **E. Voncila**, G. Fetecau, Analysis of the Stability of Synchronous Motor - Generator Unit Used in Propulsion Systems of Autonomous Electric Vehicles, ISI Proceedings Paper, Web of Knowledge, published online <http://apps.webofknowledge.com/>, 2012.
5. **E. Voncila**, G. Fetecau, Green vehicles, a necessary choice for a clean future, The 5-th eRENEWABLIA, eHYDROGENIA, eEFFICIENCIA 2011 European Conference, Bucharest, Romania, Date: SEP 20-21, 2011.

6. M. Gaiceanu, **E. Voncila**, R. Buhosu, Optimal control for electric vehicle stabilization, Fascicula III, Electrotehnica, Electronica, Automatica, Informatica, Vol.: 33, No: 2, Pag.: 73-81, Published: 2010.
7. I. Voncila, R. Buhosu, N. Badea, **E. Voncila**, Retrospectives and Prospectives in the Electric Propulsion of Autonomous Vehicles, Electrotehnica, Electronica si Automatica, Bucuresti, Vol. 58, No: 3, Page 68-73, 2010
8. **E. Voncila**, I. Voncila, R. Buhosu, Analiza stabilitatii functionale a motoarelor electrice - utilizate pentru propulsia vehiculelor electrice autonome - la variatii ale marimilor de pe portile de acces electrica si mecanica, Simpozionul Național de Electrotehnică Teoretică SNET 2010, Bucuresti, Romania, Date: 3-4 DEC 2010.

Lucrare comunicată

9. **E. Voncila**, S. Castano, L. Gauchia, J. Sanz, Li-ion battery modeling procedure using terminal dynamic measurements, International Journal on Electrical Power and Energy Systems, Elsevier

BIBLIOGRAFIE

- [ABU 04] S. Abu-Sharkh, D. Doerffel, Rapid test and non-linear model characterisation of solid-state lithium-ion batteries, *Journal of Power Sources*, vol. 130, pp. 266–274, 2004.
- [ANDRE 11] D. Andre, M. Meiler, K. Steiner, H. Walz, T. Soczka-Guth, D.U. Sauerb, Characterization of high-power lithium-ion batteries by electrochemical impedance spectroscopy. II: Modelling, *Journal of Power Sources* , Volume 196, Issue 12, 15 June 2011, Pages 5349-5355.
- [ANDREA 10] D. Andrea, *Battery Management Systems for large Lithium-Ion Battery Packs*, Ed. Artech House, 2010.
- [AIF 09] K.E. Aifantis, S. A. Hackney, R. Vasant Kumar, *High Energy Density Lithium Batteries*, 2009, Ed. Wiley VCH.
- [BATTUNIV 12] <http://batteryuniversity.com/>
- [BER 02] P. J. Berlowitz and C. P. Darnell, Fuel choices for fuel cell powered vehicles, *Society of Automotive Engineers (SAE) Journal*, Paper No. 2000-01-0003, Warrendale, PA, 2002.
- [BPSR 11] BP statistical review of world energy. London: BP; June 2011, <http://www.bp.com>.
- [BROUSSELY 07] M. Broussely, G. Pistoia, *Industrial Applications of Batteries. From cars to aerospace and energy storage*, 2007, Ed. Elsevier.
- [BCG 10] Boston Consultancy Group, *Batteries for Electric Cars. Challenges, Opportunities, and the Outlook to 2020* (2010) Retrieved from, <http://www.bcg.com/documents/file36615.pdf>.
- [CHA 00] H.L. Chan, D. Sutanto, A New Battery Model for use with Battery Energy Storage Systems and Electric Vehicles Power Systems, *Power Engineering Society Winter Meeting*, vol. 1, pp. 470 – 475, 2000.
- [CHA 08] Chamon M, Mauro P, and Okawa Y, Mass car ownership in the energy market giants, *Economic Policy*, Vol. 23, 245-296, 2008.

- [CHE 06] M. Chen, G.A. Rincon-Mora, Accurate Electrical Battery Model Capable of Predicting Runtime and I–V Performance, IEEE Transaction on energy conversion, vol. 21, no. 2, 2006.
- [CHI 01] C.F. Chiasserini, R.R. Rao, Energy Efficient Battery Management, IEEE Journal on selected areas in communications, vol. 19, no. 7, 2001.
- [COM(2011) 112] European Commission, A roadmap for moving to a competitive low carbon economy in 2050, 8.03.2011, Com (2011) 112 final, Bruxelles, 2011.
- [COM(2011) 144] European Commission, Wite Paper. Roadmap to a Single European Transport Area Towards a competitive and resource efficient transport system, Com (2011)144 final, Bruxelles, 28.03.2011.
- [CONWAY, 99] B. E. Conway, Electrochemical Supercapacitors, 1999, Kluwer Academic Publisher.
- [CME 11] The New York Merchantile Exchange, www.cmegroup.com.
- [CUC 11] Cucos A. F., Voncila E, Alternative energy, environmental friends, The 5-th International Conference ARTCAST 2010, Galati, Romania.
- [CUN 96] J.P. Cun, J.N. Fiorina, M. Fraisse, H. Maboux, The Experience of a UPS Company in Advanced Battery Monitoring, 18th Telecommunications Energy Conference, 1996.
- [DAHLIN 10] G.R, Dahlin, K.E. Storm, Lithium Batteries. Research, Technology and Applications, 2010, Nova Science Publishers.
- [DE 07] Department of Energy. Office of Basic Energy Sciences Workshop, Technology and Applied R&D Needs for Electrical Energy Storage, March 2007.
- [DEL 01] D.M. Dell, D.A.J. Rand, Understanding batteries, 2001, Ed. RSC.
- [DG TREN 10] European Commission, Directorate-General for Energy and Transport (DG TREN), EU Energy in Figures 2010, Greenhouse Gas (GHG) Emissions by Sector, Bruxelles, 26.06.2010.
- [DOE 07] D. Doerffel, Testing and Characterisation of Large High-Energy Lithium Ion Batteries for Electric and Hybrid Electric Vehicles, PhD Thesis, University of Southampton, faculty of Engineering, Science and Mathematics, 2007.
- [DPR 11] www.drpciv.ro

- [ECR 11] EEA Report No 4/2011, Greenhouse gas emission trends and projections in Europe 2011 - Tracking progress towards Kyoto and 2020 targets, <http://www.eea.europa.eu/>.
- [EHS 04] M. Ehsani, Y. Gao, S. Gay, A. Emadi, Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles. Fundamentals Theory and Design. CRC Press, 2004.
- [EIA 07] US energy Information Administration, from Oil and Gas Journal, 2007.
- [EIA 11] <http://www.eia.doe.gov/oiaf/1605/ggrpt/>.
- [ENSAHI 10] M. Ensahi, Y. Gao, A. Emadi, Modern Electric, Hibrid Electric, and fuell Cel Vehicles, 2010, Ed. CRC.
- [EPRI 12] www.epri.com
- [FREEDONIA 12] www.freedoniagroup.com
- [FUL 94] T. F. Fuller, M. Doyle, and J. Newman, Simulation and optimization of the dual lithium ion insertion cell, Journal of the Electrochemical Society, vol. 141, no. 1, pp. 1 – 10, 1994.
- [FUL 94] T. F. Fuller, M. Doyle, and J. Newman, Relaxation phenomena in lithium-ion-insertion cells, Journal of the Electrochemical Society, vol. 141, no. 4, pp. 982 – 990, 1994.
- [GAO 03] Y. Gao, H. Moghbelli, M. Ehsani, G. Frazier, J. Kajs, and S. Bayne, “Investigation of high-energy and high-power hybrid energy storage systems for military vehicle application,” Society of Automotive Engineers (SAE) Journal, Paper No. 2003-01-2287, Warrendale, PA, 2003.
- [GAO 02] L. Gao, S. Liu, and R.A. Dougal, Dynamic Lithium-Ion Battery Model for System Simulation, IEEE Transactions on components and packaging technologies, vol. 25, no. 3, 2002.
- [GAU 09] L. Gauchía Babé, Nonlinear dynamic per-unit models for electrochemical energy systems. Application to a hardware-in-the-loop hybrid simulation, 2009
- [GER 12] S. J. Gerssen-Gondelach, A. P.C. Faaij, Performance of batteries for electric vehicles on short and longer term, Journal of Power Sources 212 (2012) 111 - 129.
- [GOU 10] B. Gou, W. Ki Na, B. Diong. Fuel cells. Modelling, Control, and Applications.

CRC Press, 2010.

- [GO 06] F. González-Longatt. Circuit Based Battery Models: A Review, II Congreso Iberoamericano de Estudiantes de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Computación, 2006.
- [GM 12] <http://gmsustainability.com>
- [GAZ 12] www.gazonline.ro
- [GRE 12] www.greenreport.com
- [HE 11] H. He, R. Xiong, and J. Fan, Evaluation of Lithium-Ion Battery Equivalent Circuit Models for State of Charge Estimation by an Experimental Approach, *Energies*, vol. 4, pp. 582-598, 2011.
- [HU 12] G. Hu, S. Duan, et al., Modelling, Control and Implementation of Li-Ion battery Charger in Electric Vehicle Application, 2012.
- [HU 09] Y. Hu, S. Yurkovich, Y. Guezennec, and B.J. Yurkovich, A technique for dynamic battery model identification in automotive applications using linear parameter varying structures, *Control Engineering Practice*, vol. 17, no. 10, pp. 1190-1201, 2009.
- [ITF 11] International Transport forum, Transport Outlook 2011, Meeting the Needs of 2 billion People, 2011.
- [IEA 11] IEA, IEA Renewable Energy Essentials: Wind International Energy Agency, 2008.
- [KUR 09] P. Kurzweil, K. Brandt, Secondary Batteries Lithium - Rechargeable Systems, *Encyclopedia of Electrochemical Power Source*, pp. 1-26, 2009.
- [LAR 03] J. Larminie, J. Lowry, Electric vehicle technology explained, 2003, Ed. John Wiley & Sons Ltd.
- [LEE 03] S. Lee, J. Kim, et al., State of charge and capacity estimation of lithium ion battery using a new open circuit voltage versus state of charge, *Journal of Power Sources*, Vol. 185, page 1367-1373, 2008.
- [LINDEN 01] D. Linden, T. B. Reddy, Handbook of batteries, 2001, Ed. Mc Graw Hill.
- [MAXWELL 11] <http://editors.maxwell.com/>

- [NEDSTACK 12] www.nedstack.com/
- [NIS 11] National Institute of Statistics, Romania, Press Bulletin form 24.02.2011
- [NISHIO 99] K. Nishio, N. Furukawa, Handbook of Battery Materials, J.O. Besenhard, Ed., Wiley-VCH, Weinstein, 1999.
- [OICA 11] Organisation Internationale des Constructeurs d'Automobiles, <http://oica.net>
- [OFF 10] G.J. Offer and all. Comparative analysis of battery electric, hydrogen fuel cell and hybrid vehicle in future sustainable road transport system, Energy Policy, Volume 38, Issue 1, Pages 24-29, January 2010.
- [OPEC 11] www.opec.org
- [OSWAL 10] M. Oswal, J. Paul, R. Zhao, A comparative study of Lithium ion batteries, University of Southern California, 2010, <http://www-scf.usc.edu>.
- [PAN 01] S. Pang, J. Farrell, J. Du, and M. Barth, Battery state-of charge estimation, Proceedings of the American Control Conference, vol. 2, pp. 1644-1649, 2001.
- [PAR 10] C. Park, Next generation Li-ion battery for electrical vehicles, Ed. In-Teh, 2010.
- [PIS 08] G. Pistoia, Battery Operated Devices and Systems, 2008, Ed. Elsevier.
- [PIS 10] G Pistoia, Electric and hybrid vehicles, Power Sources, Models, Sustainable Infrastructure and the Market, Ed Elsevier, 2010.
- [POP 05] V. Pop, State-of-the-art of battery state-of-charge determination, Meas. Sci. Technol, 2005.
- [PRI 05] F. Princiotta, Global Climate Change. The Technology Challenge, Ed. Springer, 2011.
- [PR 11] Lithium Ion Batteries for Hybrid, Plug-in Hybrid, and Battery Electric Vehicles: Market Analysis and Forecasts. <http://www.pikeresearch.com/>.
- [QIAN 11] K. Qian, C. Zhou, M. Allan, and Y. Yuan, Modeling of Load Demand Due to EV Battery Charging in Distribution Systems, IEEE Transactions on Power systems, Vol. 26, No. 2, May 2011.
- [RBSC 11] Roland Berger Strategy Consultants, "Global Vehicle Li-Ion Market Study, August 2011.
- [ROOT 11] M. Root, The TAB Battery Book, Ed McGraw Hill, 2011.

- [RON 06] P. Rong, M. Pedram, An Analytical Model for Predicting the Remaining Battery Capacity of Lithium-Ion Batteries, IEEE Transaction on very large scale integration systems, vol. 14, no. 5, 2006.
- [RON 03] P. Rong and M. Pedram, An analytical model for predicting the remaining battery capacity of lithium-ion batteries, Proc. Design, Automation, and Test in Europe Conf. and Exhibition, pp. 1148–1149, 2003.
- [SAFT 09] Rechargeable Li-Ion battery. Doc. Nr. 54049-2-2009. www.saftbatteries.com
- [SAFT 11] www.saftbatteries.com
- [SAL 06] Z.M. Salameh, M.A. Casacca, and W.A. Lynch, A Mathematical Model for Lead-Acid Batteries, IEEE Transactions on Energy Conversions, vol. 7, no. 1, pp. 93-97, 1992.
- [SAL 92] M. Salameh, M.A. Casacca, and W.A. Lynch, A Mathematical Model for Lead-Acid Batteries, IEEE Trans. on Energy Conversion, vol. 7, no. 1, 1992.
- [SAMMERS, 06] N. Sammers, Fuel Cell Technology, Ed. Springer, 2006.
- [SHA 11] A. Shafiei, A. Momeni, and S. Williamson, Battery Modeling Approaches and Management Techniques for Plug-in Hybrid Electric Vehicles, Vehicle Power and Propulsion Conference, 2011.
- [SHUKLA 01] A.K. Shukla, S. Venugopalan and B. Hariprakash, J. Power Sources 100 (2001) 125.
- [SUDWORTH 85] J. Sudworth, A.R. Tiley, Sodium Sulphur Battery, Ed. Chapman and Hall, 1985.
- [TGW 12] www.thegreencarwebsite.co.uk.
- [TUPHORN 90] J. Tophorn, Valve-regulated lead/acid batteries: systems, properties and applications, J. Power Sources 31 (1990) 57.
- [VINCENT 03] C. Vincent, B.Scrosati, Modern Batteries: An Introduction to Electrochemical Power Sources, 2003, Ed. Butterworth-Heinemann.
- [VAN 10] O. Van Vliet, A.S. Brouwer, T. Kuramochi, M. Van den Broek, A. Faaij, Energy use, cost and CO₂ emissions of electric cars, Journal of Power Sources 196 (4) (2011).
- [VOL 12] www.volovocars.com

- [VONA 12] Voncila, I., Voncila, E., Fetecau, G., Analysis of the Stability of Synchronous Motor - Generator Unit Used in Propulsion Systems of Autonomous Electric Vehicles, ISI Proceedings Paper, Web of Knowledge, published online <http://apps.webofknowledge.com/>, 2012.
- [VONR 10] Voncila I., Buhosu R., Badea N., Voncila E., Retrospectives and Prospectives in the Electric Propulsion of Autonomous Vehicles, Revista Electrotehnica, Electronica si Automatica, Bucuresti, Volumul: 58, Numarul: 3, Pagini 68-73, Publicat: iul-sept. 2010.
- [VONA 10] Voncila E., Voncila I., Buhosu R., Analiza stabilitatii functionale a motoarelor electrice - utilizate pentru propulsia vehiculelor electrice autonome - la variatii ale marimilor de pe portile de acces electrica si mecanica, Simpozionul Național de Electrotehnică Teoretică SNET 2010, Location: Bucuresti, Romania, Date: 3-4 DEC 2010.
- [VONA 11] Voncila E., Fetecau G., Green vehicles, a necessary choice for a clean future, The 5-th eRENEWABLIA, eHYDROGENIA, eEFFICIENCIA 2011 European Conference, Location: Bucharest, Romania, Date: SEP 20-21, 2011.
- [VONLI 12] Lucrare comunicata
Voncila E., Castano S., Gauchia L., Sanz J., Li-ion battery modeling procedure using terminal dynamic measurements, International Journal on Electrical Power and Energy Systems, Elsevier.
- [VONR 12] E. Voncila, I. Voncila, G. Fetecau, Real time State of Charge estimation of Li-Ion battery integrated on electric vehicles, UNITECH 2012, International Conferece, Garvobo, Bulgaria, 2012
- [YOSHIO 09] M. Yoshio, R.J. Brodd, A. Kozawa, Lithium Ion Batteries, Ed. Springer, 2009
- [WILLIAMS 11] S.S. Williamson, P. A. Cassani, Energy Storage, 2011, Elsevier.
- [ZHA 02] Q.X. Zha, Introduction of Kinetics of electrode processes, 3rd edition. Beijing: Science Press, pp.136-140, 2002.
- [ZEES 10] Zeeshan Amin. Automobiles and Air Pollution. Apr 4, 2010.