

Contribuții privind estimarea în timp real a stării de încărcare și a unor parametri caracteristici la bateriile de tip Li-ion utilizate în industria auto

Teză destinată obținerii
titlului științific de doctor inginer
la
Universitatea "Politehnica" din Timișoara
în domeniul Inginerie Electrică
de către

Adriana Trăistaru

Conducător științific:
Referenți științifici:

Prof.univ.dr.ing. Ioan Șora
Prof.univ.dr.ing. Radu Munteanu
Prof.univ.dr.ing. Nicolae Golovanov
Conf.univ.dr.ing. Alexandru Hedeș

Părinților mei,

Cuvânt înainte

Doresc să aduc sincere mulțumiri domnului prof. dr. ing. Ioan Șora, conducătorul științific al tezei de doctorat, pentru îndrumarea activității mele științifice pe întreaga durată a stagiului de doctorat, pentru încrederea acordată, sprijin, permanente încurajări și pentru răbdarea de care a dat dovadă în tot acest timp.

De asemenea, deoarece munca depusă în scopul realizării și finalizării acestei teze de doctorat a fost făcută și cu sprijinul companiei Continental Automotive, doresc să mulțumesc aceluia care m-au sprijinit, direct sau indirect: ing. Alexandru Mișu, dr.ing. Dirk Neunzig, ing. Michael Doericht, ing. Daniel Andree, ing. Oliver Bremicker. De asemenea doresc să mulțumesc colegilor mei de serviciu pentru încurajări și sprijin profesional.

Nu în ultimul rând doresc să mulțumesc familiei mele pentru încurajări și pentru liniștea pe care am avut-o în timpul elaborării acestei teze.

Timișoara, februarie 2010

Adriana Trăistaru

CUPRINS

INTRODUCERE	7
Terminologie.....	9
1. Stadiul tehnologic și performanțele acumulatorilor electrice	10
1.1 Evoluția dezvoltării acumulatorilor electrice.....	10
1.2 Variante de acumulatori electrice	13
1.3 Compararea performanțelor acumulatorilor electrice	19
1.4 Caracteristici de funcționare a bateriilor	21
1.5 Construcția și funcționarea celulelor de tip Li-ion.....	26
1.5.1 Construcția unei celule de tip Li-ion	26
1.5.2 Fenomenele chimice din celulele de tip Li-ion	33
1.6 Concluzii	34
1.7 Bibliografie	34
2. Metode de diagnosticare a bateriilor.....	36
2.1 Utilitatea metodelor de diagnosticare a bateriilor.....	36
2.2 Istoricul metodelor de diagnosticare a bateriilor	37
2.3 Metode actuale de diagnosticare a bateriilor	41
2.3.1 Metodele de măsurare directă	41
2.3.2 Sisteme de contabilizare a sarcinii	48
2.3.3 Sisteme adaptive de diagnosticare.....	49
2.4 Concluzii	52
2.5 Bibliografie	52
3. Metode de diagnosticare pentru bateriile de tip Li-ion utilizate în aplicații din industria auto	54
3.1 Elemente privind alegerea tipului de baterie	54
3.1.1 Principii de proiectare ale sistemelor de rezervă pentru stocarea energiei electrice pentru alimentarea sistemului de frânare electric al autovehiculelor.....	54
3.1.2 Dimensionarea sistemului de rezervă pentru stocarea energiei electrice	56
3.1.3 Criterii pentru alegerea tipului de baterie.....	58
3.2 Diagnosticarea în timp real a bateriei Li-ion utilizată ca baterie de rezervă pentru sistemul de frânare electric al autovehiculului.....	60
3.2.1 Determinarea stării de încărcare a bateriei.....	61
3.2.2 Determinarea stării de sănătate a bateriei	63
3.2.3 Determinarea stării de funcționare a bateriei.....	70
3.3 Implementarea algoritmului de diagnosticare.....	71

3.3.1	Considerații preliminare.....	71
3.3.2	Descrierea implementării funcțiilor algoritmului de diagnosticare	75
3.4	Algoritmul de management al bateriilor.....	83
3.5	Concluzii	86
3.6	Bibliografie	87
4	Testarea algoritmului de diagnosticare și validarea experimentală a soluțiilor propuse.....	88
4.1	Schema și programele utilizate în scopul măsurării semnalelor de la baterie	88
4.2	Estimarea valorii rezistenței interne a bateriei.....	94
4.2.1	Estimarea valorii rezistenței interne a bateriei cu curent de descărcare corespunzător ciclurilor de frânare	94
4.2.2	Estimarea valorii rezistenței interne a bateriei cu curent de descărcare constant	104
4.3	Estimarea valorii capacității maxime utile a bateriei	115
4.4	Concluzii	126
5	Cercetări teoretice și experimentale privind comportamentul termic al bateriilor de tip Li-ion	127
5.1	Introducere	127
5.2	Managementul termic al bateriilor de tip Li-ion 26650 în medii cu temperaturi scăzute.....	127
5.2.1	Considerații teoretice	128
5.2.2	Modelarea termică a unei celule de tip Li-ion 26650	132
5.2.3	Validarea experimentală a modelului termic.....	133
5.3	Autoîncălzirea bateriilor de tip Li-ion 26650 în timpul proceselor de descărcare.....	141
5.3.1	Estimarea puterii disipate în interiorul bateriei în timpul procesului de descărcare	141
5.3.2	Validarea experimentală a modelului termic al celulei.....	147
5.4	Concluzii	162
5.5	Bibliografie	162
6	Concluzii generale și contribuții personale.....	164

INTRODUCERE

Bateriile de tip Li-ion sunt sistemele de stocare a energiei electrice care au fost alese ca sisteme de rezervă pentru alimentarea unui sistem de frânare complet electric (brake-by-wire) al unui automobil. Având în vedere importanța aplicației pe care o alimentează aceste baterii, este necesar să se elaboreze un sistem de diagnosticare în timp real și de management a acestor baterii pentru a obține energie electrică la parametrii ceruți de aplicație pe toată durata de viață a acestora.

Principalele obiective ale acestei teze sunt:

- Să găsească un algoritm precis și sigur pentru diagnosticarea în timp real a sistemului de rezervă (baterii Li-ion) pentru stocarea energiei electrice folosit pentru alimentarea aplicației de frână electrică;
- Să determine parametrii bateriei care evidențiază cel mai bine starea în care se găsește bateria în fiecare moment de funcționare a automobilului;
- Să stabilească metode de management termic al bateriilor în scopul aducerii și menținerii bateriilor în stare de funcționare, fără a le afecta durata de viață, în scopul obținerii energiei electrice la parametrii ceruți de aplicația de frână electrică;
- Să elaboreze strategiile și scenariile de testare cele mai potrivite, cu ajutorul cărora se vor verifica algoritmul de diagnosticare și modelele termice propuse;
- Să prezinte o analiză comparativă a datelor obținute în urma rulării algoritmului de diagnosticare cu cele obținute în urma testelor;
- Să prezinte o analiză comparativă a datelor obținute în urma simulărilor cu ajutorul modelelor termice propuse cu datele obținute în urma efectuării testelor experimentale.

Teza este structurată în 6 capitole, astfel:

Capitolul 1 prezintă variantele de acumulatori electrice existente la ora actuală, cu principalele lor caracteristici. De asemenea, în acest capitol se prezintă detaliat construcția unei celule cilindrice de tip Li-ion și modul ei de funcționare.

Capitolul 2 prezintă evoluția în timp a metodelor de diagnosticare a bateriilor și sunt prezentate detaliat câteva dintre metodele actuale cele mai întâlnite de diagnosticare a bateriilor. De asemenea, este prezentată o analiză comparativă a acestor metode de diagnosticare pentru a evidenția avantajele și dezavantajele fiecăreia și domeniile de utilizare cele mai potrivite.

Capitolul 3 prezintă principiile de dimensionare și de alegere a tipului de baterie pentru aplicația de frână electrică. De asemenea, este prezentat în detaliu algoritmul de diagnosticare în timp real a bateriilor de tip Li-ion, atât ca și concept unitar cât și ca mod de implementare a acestuia ținând cont de cerințele aplicației și restricțiile sistemului de implementare. Programul utilizat la implementarea algoritmului de diagnosticare este Matlab/Simulink împreună cu mediul SDA (System Design Automation), mediu care este imaginea funcțională a sistemului de operare al microcontrolerului.

Capitolul 4 prezintă strategiile și scenariile de testare utilizate pentru a verifica soluțiile propuse în algoritmul de diagnosticare. Sunt prezentate echipamentele utilizate în timpul testelor, programele LabView pentru comanda acestora și pentru achiziția datelor măsurate de la baterie. Parametrii bateriilor, care sunt estimați în timp real, sunt: starea de încărcare momentană a bateriei, rezistența internă a

bateriei și capacitatea maximă utilă a acesteia. Rezultatele experimentelor sunt apoi analizate și comparate cu rezultatele obținute în urma rulării algoritmului de diagnosticare.

Capitolul 5 prezintă modelele termice ale celulei cilindrice Li-ion 26650 pentru două cazuri luate în considerare: încălzirea celulei cu folie încălzitoare în cazul când temperatura mediului ambiant este sub 0°C și autoîncălzirea acesteia în timpul proceselor de descărcare, în special pentru curenți mari de descărcare. De asemenea sunt prezentate echipamentele și scenariile de testare pentru validarea acestor modele termice, în ambele cazuri studiate.

Capitolul 6 prezintă concluziile generale și contribuțiile personale ale autoarei pentru rezolvarea obiectivelor propuse.

Terminologie

Aceste definiții sunt în concordanță cu Standardele Europene [1.9].

Anodul (într-o celulă electrochimică): electrodul care este oxidat. Acesta este electrodul negativ în timpul procesului de descărcare și electrodul pozitiv în timpul procesului de încărcare.

Catodul (într-o celulă electrochimică): electrodul care este redus. Acesta este electrodul pozitiv în timpul procesului de descărcare și electrodul negativ în timpul procesului de încărcare.

Celulă: un ansamblu electrochimic realizat din electrozi și electrolit, care constituie unitatea de bază a unei baterii.

Baterie: două sau mai multe celule conectate împreună și utilizate pentru stocarea energiei electrice.

Celulă secundară: celulă reîncărcabilă.

Capacitatea celulei: cantitatea de electricitate sau de sarcină electrică pe care o poate furniza o celulă complet încărcată în condițiile specificate (curent de descărcare, tensiune finală, temperatură). Notă: În SI unitatea de măsură pentru sarcina electrică este Coulomb-ul, dar în practică, capacitatea bateriei este exprimată în amperi-oră (Ah).

Energia celulei: energia pe care o poate furniza o celulă complet încărcată în condițiile specificate. Notă: în SI unitatea de măsură pentru energie este Joule dar, în practică, energia unei baterii este exprimată în wați-oră (Wh).

Viteza de încărcare/descărcare: Curentul la care celula este încărcată/descărcată.

Viteza de încărcare/descărcare "C": O metodă uzuală pentru exprimarea curentului de încărcare sau de descărcare exprimată prin:

$$I = M * C_n$$

Unde **I** este curentul exprimat în amperi, **M** este multiplu sau fracție din C_n , C_n este capacitatea nominală declarată de producător în amperi-oră, iar **n** este timpul în ore pentru care capacitatea nominală a fost declarată.

Tensiunea de circuit deschis (OCV – Open Circuit Voltage): Tensiunea bateriei când aceasta nu alimentează nici un consumator.

Tensiunea nominală: este acea tensiune care este general acceptată ca fiind tensiunea de funcționare a bateriei.

Supraîncărcare: Continuarea încărcării după ce s-a terminat încărcarea completă a unei celule sau baterii.

Autodescărcarea: Pierderea energiei chimice datorită reacțiilor spontane din interiorul bateriei când aceasta nu este conectată la un circuit exterior.

1. Stadiul tehnologic și performanțele acumulatorilor electrice

1.1 Evoluția dezvoltării acumulatorilor electrice

Bateria este un dispozitiv capabil să convertească energia chimică în energie electrică și vice versa. Energia chimică este stocată în speciile electroactive ale celor doi electrozi ai bateriei. Conversiile apar în timpul reacțiilor electrochimice de oxidoreducere (redox) sau de transfer de sarcină. Aceste reacții implică schimbul de electroni între speciile electroactive din cei doi electrozi printr-un circuit extern al bateriei. Reacțiile au loc la interfețele electrod/electrolit. Când curentul trece printr-o baterie, la unul dintre electrozi are loc reacția de oxidare iar la celălalt cea de reducere. Prin oxidare se cedează electroni circuitului exterior, iar reacția de reducere preia acești electroni din circuitul exterior. Electrolitul servește ca intermediar între cei doi electrozi oferind un mediu pentru transferul ionilor. Deci, circulația de curent este susținută de electroni înăuntrul electrozilor și de ioni în interiorul electrolitului. În exterior curentul circulă prin sursă – dacă bateria se încarcă sau prin sarcină – dacă bateria se descarcă. Unitatea de bază electrochimică se numește celulă, dar cuvântul uzual folosit este baterie atât pentru o celulă cât și pentru două sau mai multe celule legate în serie sau paralel.

Două nume au fost asociate cu dezvoltarea bateriilor și tehnologiilor aferente: Luigi Galvani și Alessandro Volta. Volta a fost prima persoană din timpurile moderne care a construit o baterie. El și-a patentat soluția în anul 1800. În 1834 Michael Faraday a dedus legile electrochimiei bazându-se pe rezultatele cercetărilor lui Volta, legi care stabilesc legătura dintre energia chimică și cea electrică. Bazându-se pe rezultatele lui Volta, alți cercetători au proiectat diverse tipuri de baterii. O problemă des apărută în funcționarea acestor baterii era degajarea de gaz la electrozi. Leclanche a găsit cea mai bună soluție pentru a rezolva această problemă în 1866. El a utilizat pentru electrodul pozitiv dioxid de mangan amestecat cu carbon în scopul de a îmbunătăți conductivitatea electrică. Acest amestec a fost fixat pe o placă de grafit care servea ca și colector. El a utilizat zinc pentru electrodul negativ, iar ca electrolit era folosită clorura de amoniu.

În 1859 un alt eveniment important în dezvoltarea bateriilor a fost studierea comportării diferitelor metale în diverși electroliți, în special în acid sulfuric diluat, de către Gaston Plante. El a construit baterii sub forma unui sandwich din straturi subțiri de plumb separate de bucăți de postav situate într-o cutie cilindrică umplută cu acid sulfuric diluat. O diferență importantă față de celula Leclanche a fost faptul că celula construită de Plante poate fi reîncărcată. Așa numitele baterii cu plumb sunt încă larg răspândite azi - de exemplu pentru pornirea motoarelor cu ardere internă ale automobilelor.

Waldemar Jungner în Suedia și Thomas Edison în SUA au pus bazele industriei bateriilor de tip NiCd și Ni-Fe alcaline între anii 1895 și 1905. Un avantaj important al folosirii soluțiilor alcaline în loc de cele acide ca electrolit a fost posibilitatea utilizării unei game largi de materiale pentru electrozi și incinte, deoarece metale cum ar fi nichelul sunt afectate de soluțiile acide.

În 1839 William Grove a realizat experimente pentru a investiga decompoziția apei în hidrogen și oxigen utilizând electrozi de platină. El a observat că atunci când încărcarea celulei era oprită, un curent electric începe să circule în sens invers datorită recombinației oxigenului și hidrogenului la electrozii de platină. Aceste experimente au pus bazele dezvoltării celulelor de combustie, în care energia stocată în combustibilii fosili e transformată direct în energie electrică. Materialele active dintr-o celulă de combustie sunt furnizate în mod continuu dintr-o sursă externă celulei, iar produșii de reacție sunt îndepărtați continuu din celulă. Cunoștințele acumulate în studierea pilelor de combustie au fost mai apoi utilizate la dezvoltarea bateriilor metal-aer, care au electrodul negativ din zinc iar cel pozitiv din carbon poros. Aceste baterii sunt cunoscute sub denumirea baterii zinc-aer.

În 1990 au apărut bateriile de tip nichel-metal hidrid (NiMH) iar în 1991 cele de tip Li-ion (litiu- ion), fapt care a fost de o importanță majoră pentru produsele portabile. Pe lângă necesitatea unei densități mai mari de energie, problemele legate de protecția mediului au dus la dezvoltarea acestor noi tipuri de baterii.

O distincție importantă legată de baterii poate fi făcută între bateriile primare și cele secundare. Cele primare sunt nereîncărcabile, în timp ce cele secundare sunt reîncărcabile. Fiecare sistem de baterii e caracterizat de reacțiile chimice din interior. Exemple de baterii primare sunt: zinc-carbon (Leclanche, de asemenea cunoscute ca zinc – dioxid de mangan ($ZnMnO_2$)), zinc – alcalin – MnO_2 (cunoscute ca baterii alcaline), zinc-aer, mercur-oxid și litiu. Exemple de baterii secundare: plumb - acid, NiCd, NiMH, Li-ion, Li-ion-polimer, zinc-alcalin- MnO_2 .

Cele mai multe sisteme de baterii existente pe piață sunt fie cilindrice fie prismatice și sunt valabile în diverse variante. Aceste variante au fost optimizate pentru aplicații specifice. De exemplu: bateriile de curenți mari care permit descărcarea cu curenți de valoare mare, de câteva ori curentul nominal, baterii pentru funcționare la temperaturi înalte, baterii de mare capacitate, baterii cu încărcare rapidă, care permit o încărcare cu curenți de valoare mare. Aceste caracteristici au fost obținute prin modificarea formei sau materialului electrozilor adăugând diverse materiale în compoziția acestora. De exemplu, utilizarea așa numiților electrozi sinterizați în baterii duce la o scădere puternică a impedanței interne a bateriilor. Acest lucru permite descărcarea bateriilor cu curenți de valoare mai mare.

Câteva caracteristici ale unor baterii secundare sunt prezentate în tabelul.1.1 [1.1] :

12 Stadiul tehnologic și performanțele acumulatorilor electrice - 1.

Tab.1.1 Caracteristici de bază ale unor tipuri de baterii secundare

Tipul de baterii:	NiCd	NiMH	Li-ion	Li-ion-polimer	Plumb-acid	Alcaline
Tensiunea medie de operare [V]	1.2	1.2	3.6	3.6	2.0	1.5
Densitatea volumică de energie [Wh/m ³]*10 ⁻³	90..150	160..310	200..280	200..250	70..90	250
Densitatea masică de energie [Wh/kg]	30..60	50..90	90..115	100..110	20..40	20..85
Rata de autodescărare [%/luna] la 20 ⁰ C	10..20	20..30	5..10	1	4..8	0.2
Cicluri de viață	300..700	300..600	500..1000	200	200.500	15..25
Plaja de temperaturi [C]	-20..50	-20..50	-20..60	-20..60	-30..60	-30..50

1.2 Variante de acumulatori electrice

A. Baterii cu plumb

Tehnologia bateriilor cu plumb este relativ veche, dar încă larg răspândită în multiple aplicații. Electrocul pozitiv este realizat din dioxid de plumb (PbO_2), iar cel negativ din plumb metalic. Acidul sulfuric (H_2SO_4) e utilizat ca electrolit. Tensiunea medie de operare a unei celule este 2 [V].

Avantajele acestor tipuri de baterii sunt curentul mare de descărcare și o rată de autodescărcare relativ scăzută. Mai mult, aceste tipuri de baterii nu prezintă efectul de memorare și de asemenea au un preț scăzut.

Un dezavantaj major al bateriilor cu plumb îl constituie densitatea mică de energie și energie specifică. Aceste baterii sunt grele și ocupă mult spațiu. O altă problemă este legată de capacitatea pierdută datorită descărcării accentuate, care este ireversibilă. Descărcarea accentuată poate apărea și datorită autodescărcării bateriei. Aceasta înseamnă că durata de viață a bateriei scade când aceasta nu este folosită [1.10].

B. Baterii secundare alcaline

Aceste tipuri de baterii au fost introduse pe piață în anul 1993 de către compania Renewal din SUA.

Electrocul pozitiv al acestor tipuri de baterii este realizat din dioxid de mangan (MnO_2), iar electrocul negativ este realizat din zinc (Zn), iar hidroxidul de potasiu (KOH) este utilizat ca electrolit.

Tensiunea medie de operare a acestor tipuri de baterii este de 1.3 [V]. Bateriile reîncărcabile alcaline oferă avantajele unor rate de autodescărcare reduse și de asemenea unui cost scăzut. Dezavantajele ar fi durata mică de viață și capacitatea maximă inițială a lor e mai mică decât cea a bateriilor primare alcaline (70% din cea a bateriilor primare, la temperatura 20⁰ C). De asemenea capacitatea lor maximă scade rapid odată cu creșterea numărului de cicluri de încărcare/descărcare [1.10].

C. Baterii de tip NiCd

Bateriile NiCd sunt cunoscute ca fiind relativ ieftine și robuste. Cele mai multe baterii NiCd pot furniza curenți mari și acestea se pot încărca într-o perioadă de timp relativ scurtă. Aceste caracteristici recomandă ca aceste baterii să fie folosite pentru aplicații de putere. Electrocul pozitiv este realizat dintr-un compus hidroxid de nichel/oxihidroxid de nichel ($\text{Ni}(\text{OH})_2/\text{NiOOH}$), în timp ce electrocul negativ este realizat din cadmiu (Cd) și hidroxid de cadmiu ($\text{Cd}(\text{OH})_2$). Electrolitul este o soluție apoasă de hidroxid de potasiu (KOH). O îmbunătățire majoră a densității de energie și a energiei specifice a fost obținută prin utilizarea unei spume de nichel de mare porozitate în locul nichelului sinterizat ca substrat pentru materialele active. Deși sunt foarte potrivite pentru aplicațiile de mare putere, bateriile de tip NiCd au unele dezavantaje. În primul rând, densitatea de energie și energia specifică sunt relativ scăzute. În al doilea rând, acest tip de baterii suferă de așa numitul efect de memorare. Acest efect poate fi definit ca o scădere a capacității maxime a bateriei odată cu ciclurile parțiale de încărcare/descărcare. Dacă ciclurile de încărcare/descărcare parțiale continuă, bateria va putea să furnizeze doar capacitatea încărcată/descărcată de ciclurile parțiale. Tensiunea bateriei scade semnificativ după ce aceasta capacitate a fost descărcată și din acel moment cele mai multe dispozitive nu vor mai putea funcționa. Totuși, întreaga capacitate a bateriei se poate restabili supunând bateria la câteva cicluri complete de

14 Stadiul tehnologic și performanțele acumulatorilor electrice - 1.

încărcare/descărcare. Un ultim dezavantaj ar fi că utilizarea cadmiului implică serioase probleme legate de protecția mediului [1.10].

D. Baterii de tip NiMH

Ca răspuns la valorile mici pentru densitatea de energie și energia specifică, precum și serioasele probleme legate de protecția mediului care sunt asociate cu tehnologia NiCd, în 1990 compania Sanyo Electric din Japonia a dezvoltat o nouă tehnologie care a stat la baza unor noi tipuri de baterii: nichel – metal hidrid (NiMH). Datele din tabelul. 1.1 ilustrează faptul că bateriile de tip NiMH oferă aceeași tensiune medie de operare ca cele de tip NiCd, dar cu marele avantaj al unei densități de energie mai mare. În bateriile de tip NiMH un metal hidrid a înlocuit electrodul de cadmiu. Electrodele pozitive și electrolitul au rămas aproximativ aceiași.

Aliajul MH este capabil să înmagazineze hidrogen într-o stare solidă. Doua clase de aliaje de metal sunt în general folosite în bateriile NiMH: AB₂ și AB₅. Clasa de aliaje AB₂ constă din titan și zirconiu, în timp ce aliajele din clasa AB₅ conțin aliaje din pământuri rare bazate pe lantan și nichel. Aproape toate bateriile NiMH existente pe piață sunt bazate pe clasa de aliaje AB₅. Aceste aliaje oferă posibilitatea unui curent mare de descărcare a bateriei și a unor caracteristici de stabilitate mai bune decât aliajele din clasa AB₂ [1.4].

Deși procesele chimice din bateriile tip NiMH sunt similare cu cele din bateriile NiCd, există totuși unele diferențe între cele două [1.4]:

- Bateriile de tip NiMH au o mai mare densitate de energie decât cele de tip NiCd. Aceasta este datorată faptului că electrodele MH au o densitate mai mare de energie decât electrodele de cadmiu;

- Rata de autodescărcare a bateriilor NiMH este oarecum mai mare decât cea a bateriilor NiCd. Unul dintre factorii care influențează acest parametru este legat de abilitatea electrodelelor MH de a reține hidrogenul depozitat în condițiile de stocare. Cu cât se eliberează mai mult hidrogen, cu atât rata de autodescărcare va fi mai mare.

Cei mai mulți producători susțin că bateriile de tip NiMH nu suferă de efectul de memorare, deși se pot găsi exemple în literatură de apariție a efectului de memorare și la aceste tipuri de baterii.

- În general bateriile de tip NiMH sunt mai puțin robuste în condiții de supraîncărcare decât cele de tip NiCd. Acest lucru implică necesitatea existenței unui algoritmul de încărcare a acestor tipuri de baterii mult mai precis pentru a preveni supraîncărcarea, în special când curentul de încărcare este mare.

- O altă diferență între procesul de încărcare la bateriile de tip NiMH și cele de tip NiCd este că reacția care are loc în timpul procesului de încărcare a bateriilor NiMH este exotermică. Aceasta înseamnă că va fi generată căldură în mod continuu în timpul procesului de încărcare. Pe de altă parte, la bateriile de tip NiCd procesul de încărcare este endotermic. Aceasta înseamnă că în prima parte a încărcării căldura este absorbită.

- Altă diferență între procesele de încărcare a celor două tipuri de baterii este în legătură cu profilul de tensiune al bateriilor în cazul supraîncărcării lor, care este mult mai puțin pronunțat în cazul bateriilor NiMH decât în cazul bateriilor NiCd. Acest fapt face mult mai greu de detectat condiția de baterie încărcată complet.

E. Baterii de tip Li-ion

Primele baterii secundare de tip Li-ion au fost produse de Sony în anul 1991. Procesele chimice ale bateriilor de tip Li-ion diferă semnificativ de cele din bateriile cu nichel. Bateriile Li-ion oferă avantajul unei tensiuni medii de funcționare mari, de 3.6 [V], datorită unui potențial standard foarte negativ în raport cu electrodele standard de referință de hidrogen (SHE) [1.7]. Mai mult, bateriile Li-ion au o

densitate mare de energie specifică, deci aceste tipuri de baterii sunt mai ușoare decât cele pe bază de nichel la aceeași capacitate stocată maximă a bateriei.

Electrozii unei baterii de tip Li-ion sunt electrozi de intercalare, adică aceștia au o structură tip rețea în care speciile oaspete pot fi inserate și extrase din materialul gazdă fără mari modificări structurale ale acestuia – vezi **Fig.1.1**.

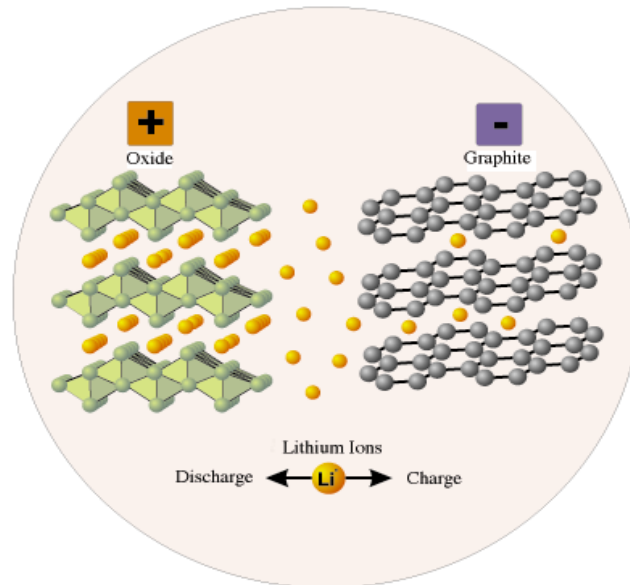


Fig.1.1 Modelul unei celule de tip Li-ion[1.4]

Funcționarea bateriilor de tip Li-ion se bazează pe transferul ionilor de litiu de la electrodul pozitiv la cel negativ în timpul încărcării și vice versa în timpul descărcării. Acest proces este denumit în literatura de specialitate principiul balansoar - "rocking chair".

Electrodul pozitiv al bateriilor de tip Li-ion conține oxid al unui metal de litiu care poate depozita/reține ioni de litiu. Cei mai întâlniți oxizi sunt LiCoO_2 – litiu oxid de cobalt, LiNiO_2 – litiu oxid de nichel și litiu oxid de mangan – LiMn_2O_4 . LiCoO_2 și LiNiO_2 au avantajul unei capacități mai ridicate. LiMn_2O_4 e mai puțin toxic și mai ieftin decât celelalte materiale. Electrodul negativ al bateriilor de tip Li-ion este realizat din carbon, cu raportul maxim al ionilor de litiu și numărul de atomi de carbon din rețea de 1:6. Electrodul de carbon poate fi realizat din grafit sau din cocs (petroleum coke). Utilizarea grafitului duce la o capacitate mai mare a bateriilor și o caracteristică de descărcare mai plată decât în cazul utilizării cocsului [1.5].

Electrolitul utilizat în bateriile de tip Li-ion nu este unul apos, ca în cazul bateriilor pe bază de nichel, el este realizat dintr-o sare dizolvată într-un solvent organic. Alegerea solventului organic este limitată la aceia bazați pe carbonat de etilenă în cazul utilizării grafitului ca electrod negativ. Alți solvenți cum ar fi carbonat de dietilenă și carbonat de polipropilenă pot fi utilizați când electrodul negativ este realizat din cocs. O alegere uzuală pentru sare este hexafluorofosfat (LiPF_6). Aspectele importante care trebuie luate în considerare la alegerea electrolitului sunt: compatibilitatea cu materialul din care sunt alcătuiți electrozii, o bună conductivitate ionică și stabilitate termică și electrochimică. În tabelul.1.1 se observă că pe lângă energia specifică mare, bateriile Li-ion au o rată de autodescărcare considerabil mai

mică decât bateriile pe bază de nichel. Mai mult, bateriile Li-ion nu au efect de memorare. În aplicații, bateriile de tip Li-ion trebuie abordate diferit de cele bazate pe nichel. În primul rând, bateriile de tip Li-ion necesită alt algoritm de încărcare decât cele pe bază de nichel. De asemenea, bateriile de tip Li-ion sunt mai puțin capabile să furnizeze curenți mari. Descărcarea excesivă a acestor tipuri de baterii duce la scăderea duratei de viață a acestora. Fără o protecție suplimentară a acestor baterii, supraîncărcarea lor poate duce la situații periculoase care pot duce la explozii sau aprinderea bateriilor. Deci, supraîncărcarea sau descărcarea excesivă a acestor tipuri de baterii nu este permisă. De asemenea, este esențial să existe un control strict al proceselor de încărcare și de descărcare a acestor tipuri de baterii atât pentru siguranța exploatării lor, cât și pentru a le prelungi durata de viață (numărul de cicluri încărcare/descărcare) – vezi **Fig.1.2**. Acest lucru presupune existența unor circuite electronice care să realizeze funcțiile de monitorizare și control.

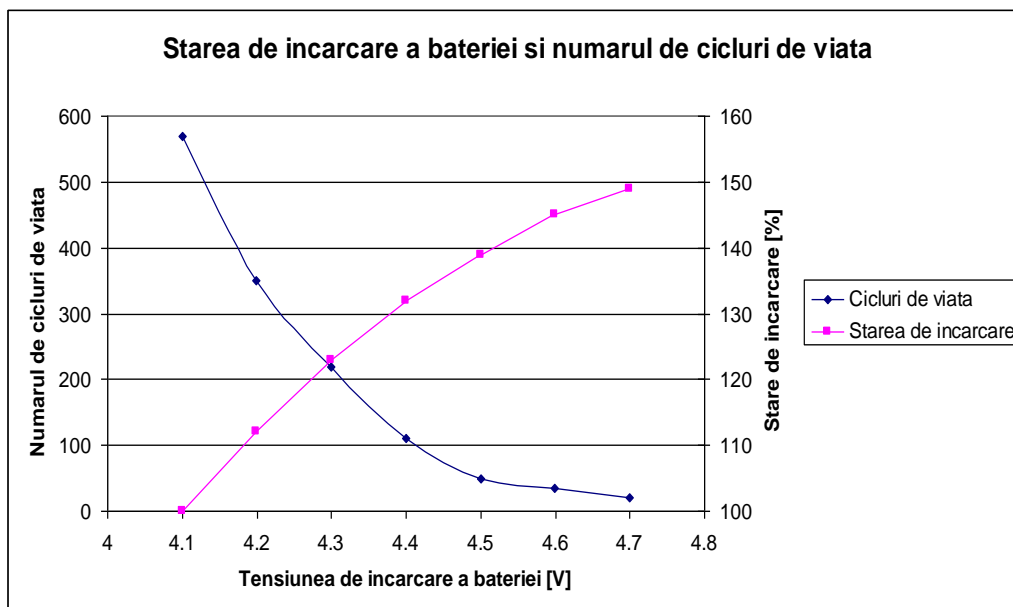


Fig. 1.2 Starea de încărcare a bateriei și numărul de cicluri de viață pentru tensiuni de încărcare ale bateriei Li-ion de peste 4.1V [1.1]

F. Baterii de tip Li-ion-polimer

Bateriile de tip Li-ion-polimer au apărut pe piață în anul 1997. Diferența de bază dintre aceste tipuri de baterii și cele de tip Li-ion se referă la tipul electrolitului folosit, care constă dintr-un polimer, material solid conductor ionic care servește și ca separator. Conductivitatea electrică a acestui tip de material este mai scăzută decât a electrolitului organic lichid. Din această cauză electrolitul din polimer trebuie să fie foarte subțire pentru a avea o conductivitate electrică rezonabilă. Faptul că acești electroliti trebuie să fie foarte subțiri face ca bateria să fie vulnerabilă la solicitări mecanice. De asemenea, funcționarea acestor tipuri de baterii la temperaturi mai mari îmbunătățește conductivitatea electrolitului de polimer. La temperatura camerei se poate obține o îmbunătățire a conductivității electrice prin

adăugarea carbonatului de polipropilenă. Îmbunătățirea conductivității se mai poate realiza prin utilizarea electrolitului de tip gel.

Electrolitii de polimer sunt mai puțin reactivi față de litiu decât cei lichizi. Acest lucru este benefic pentru siguranța în exploatare a bateriei. De asemenea, utilizarea acestor tipuri de electroliti oferă posibilitatea unei producții mai ușoare, mai rapide, celulele Li-ion-polimer putând fi configurate în diverse forme, structura unei celule fiind de tip "sandwich". Din cauză că polimerul ține straturile compacte, nu mai este nevoie de presiune suplimentară din exterior pentru a forma celula [1.5].

G. Baterii de tip Li-metal

Un pas înainte în dezvoltarea bateriilor bazate pe litiu este încercarea de a înlocui electrodul din grafit cu unul realizat din litiu metalic. Aceste baterii se numesc Li-metal și sunt încă în faza de cercetare. Cel mai mare avantaj al stocării litiului sub forma metalică în loc de a fi stocat sub formă de ioni înconjurați de atomi de carbon în proporție maximă de 1:6, este creșterea în densitate de energie și de energie specifică. Totuși, introducerea litiului sub forma metalică ridică serioase probleme legate de reactivitatea ridicată. De exemplu, litiu metalic va reacționa cu oricare electrolit de tip lichid și va forma un film inert, pasiv pe suprafața electrodului după fiecare ciclu de încărcare/descărcare. Acest proces consumă mult litiu, de aceea acesta trebuie să fie prezent în cantitate mare în interiorul bateriei, fapt care duce la scăderea densității de energie [1.7].

Cercetarea a fost inițiată având în vedere posibilitatea utilizării electrolitului din polimer, pentru că litiul reacționează mai slab cu aceste tipuri de electrolit decât cu electrolitii lichizi. Oricum, problema încă există în cazul formării neregularităților la electrodul de litiu cunoscute sub numele de dendrite. Există riscul scurtcircuitului în interiorul bateriei când aceste dendrite străpung filmul subțire de polimer. În cazul cel mai fericit, scurtcircuitul scurtează durata de viață a bateriei. Însă, creșterea substanțială de temperatură generată de curentul de scurtcircuit poate provoca aprinderea bateriei. În continuare, cercetările se vor axa pe problemele legate de siguranța în exploatare a acestor tipuri de baterii și îmbunătățirea duratei de viață a acestora [1.8].

H. Baterii zinc-aer

În plus față de tipurile de baterii prezentate anterior, în literatura de specialitate se pot găsi variate alte tipuri de baterii. Un tip interesant de baterii sunt cele secundare de tip zinc-aer. Această tehnologie este încă în faza de prototip.

Electrodul pozitiv este realizat din carbon, iar electrodul negativ este realizat din zinc (Zn), hidroxidul de potasiu (KOH) fiind utilizat ca electrolit. Electrodul de carbon este expus în aer și este utilizat doar ca suprafață reactivă, de aceea este cunoscut ca electrod "aer". Tensiunea medie de operare este între 1 și 1.2 [V].

Cel mai simplu mod de a "reîncărca" bateria este să se înlocuiască electrodul de zinc când acesta s-a consumat. În utilizările practice bateria poate fi reîncărcată și electric. Electrodul "aer" de carbon produce oxigen în timpul încărcării și consumă oxigenul în timpul descărcării. Pentru o bună funcționare a bateriilor zinc-aer trebuie să existe un sistem de control al aerului (air-management). Acest sistem asigură fluxul de aer în baterie necesar acesteia pentru a asigura curentul de descărcare. Pe de altă parte, fluxul de aer este blocat când nu e descărcat nici un curent din baterie. Evident, sistemul de control al aerului adaugă volum și greutate bateriei, iar acest fapt duce la scăderea densității de energie a bateriei. Actualele baterii de tip zinc-aer sunt sensibile la suprasolicitări electrice și pentru a preîntâmpina această problemă ele sunt echipate cu un circuit pentru monitorizarea procesului de încărcare [1.6].

I. Condensatoarele electrochimice

Condensatoarele electrochimice (electrochemical capacitors – ECs) – deseori denumite de producători în scop comercial "supracondensatoare" sau "ultracondensatoare" – înmagazinează sarcina electrică în stratul dublu de la interfața dintre electrodul de carbon și electrolit. Ca urmare, deseori sunt menționate ca și "condensatoare electrice dublu strat". Ele au fost inventate în anul 1957 de către H.I.Becker de la General Electric (U.S.Patent 2,800,616). Din păcate dispozitivul inventat de Becker nu s-a putut utiliza în practică. Realizarea condensatorului electrochimic în forma în care se utilizează astăzi este atribuită lui Robert A. Rightmire, un electrochimist de la Standard Oil Company of Ohio (SOHIO), urmat de introducerea pe piață în 1978 a produsului SuperCapacitor al firmei NEC [1.5].

Fiecare din cei doi electrozi ai condensatorului este imersat în electrolit și ei sunt separați printr-o membrană ionic permeabilă. Fiecare interfață electrod – electrolit reprezintă un condensator, deci întreaga celulă conține două condensatoare înseriate.

Datorită faptului că au suprafața internă mare datorată materialului electrodului de carbon nanoporos și a grosimii de ordinul nanometrilor a stratului dublu, condensatoarele electrochimice au o capacitate specifică masică și volumică foarte ridicată, cu câteva ordine de mărime mai mare decât cea a condensatoarelor electrostatice și electrolitice.

Tab.1.2 Compararea unor parametrii pentru fiecare tip de condensator pentru o energie stocată de 1MJ [1.5]

Tipul condensatorului	Masa [kg]	Volumul [m^3]	Cost [\$]	Timp de răspuns [secunde]
Electrostatic	200000	140	700000	10^{-9}
Electrolitic	10000	2.2	300000	10^{-4}
Electrochimic	100	0.1	15000	1

Din tabelul.1.2 [1.5] se observă clar că pentru o energie stocată de 1MJ (0.28kWh) condensatoarele electrochimice sunt sensibil mai mici ca masă, volum și au un cost mai redus decât cele electrostatice și electrolitice. Este de asemenea evident că au un timp de răspuns mai mare. Acest lucru face imposibilă folosirea lor în aplicații de filtrare a semnalelor. Pe de altă parte, timpul de răspuns al lor este mult mai rapid decât cel al bateriilor, pentru care 1 secundă este echivalent cu un curent de descărcare pentru baterii de 3600C (3600*curentul nominal).

În general, condensatoarele electrochimice au o densitate de energie scăzută, viteze de încărcare/descărcare foarte ridicate, o caracteristică de descărcare abruptă, ceea ce face ca determinarea stării de încărcare să fie ușoară, durata mare de viață. Bateriile au densitate mare de energie, viteze limitate de încărcare/descărcare, o caracteristică de descărcare relativ plată, număr limitat de cicluri de încărcare/descărcare.

Tab.1.3 Compararea unor proprietăți ale bateriilor secundare și ale condensatoarelor electrochimice[1.5]

Proprietatea	Baterie	Condensator electrochimic
Mecanismul de stocare	Chimic	Fizic
Limitarea de putere	Cinetica reacțiilor, transportul de masă	Conductivitatea ionică a separatorului
Limitarea de energie	Masa electrodului	Aria suprafeței electrodului
Tensiunea de ieșire	Aproximativ constantă – depinde de tipul bateriei	Valoare care se modifică accentuat cu starea de încărcare
Viteza de încărcare	Cinetica reacțiilor, transportul de masă	Foarte mare, la fel cu viteza de descărcare
Limitarea numărului de cicluri încărcare/descărcare	Stabilitatea fizică, reversibilitatea reacțiilor chimice	Reacții secundare
Limitarea duratei de viață	Stabilitatea termodinamică	Reacții secundare

1.3 Compararea performanțelor acumulatorilor electrice

O metodă uzuală de a compara performanțele diferitelor soluții de stocare a energiei este cea a utilizării diagramei Ragone. Următorul grafic din **Fig.1.3** arată dependența densității masice de energie [Wh/kg] în raport cu densitatea volumică de energie [Wh/m³] pentru câteva tehnologii de stocare a energiei [1.3].

Wh/kg

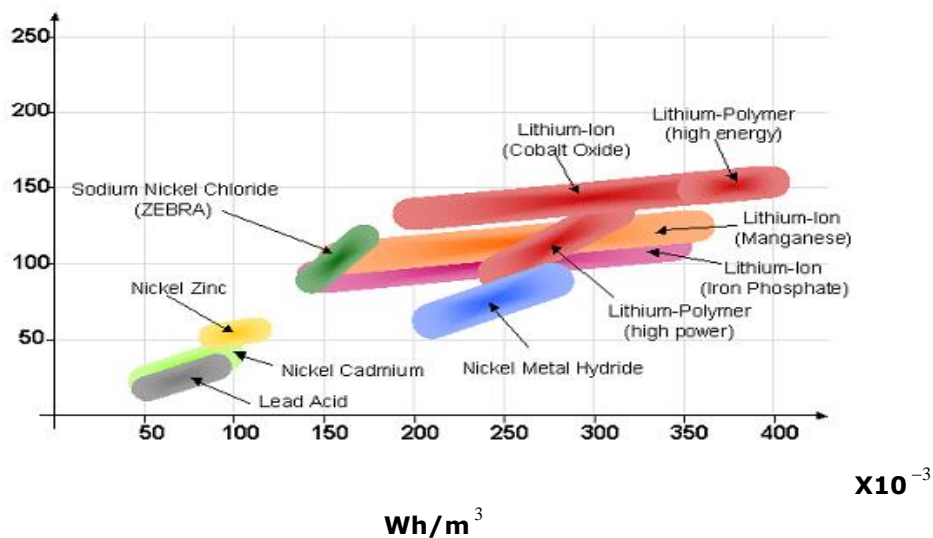


Fig.1.3 Performanțele de stocare a energiei pentru diferite tipuri de acumulatori electrice [1.3]

Fig.1.3 arată faptul că celulele Li-ion au dimensiuni mai mici și sunt mai ușoare pentru aceeași cantitate de energie stocată în comparație cu alte tehnologii. Volumul și greutatea sunt un sfert în comparație cu bateriile cu plumb de exemplu.

Această diagramă nu furnizează nici o informație despre capabilitățile de putere ale bateriei Li-ion, adică dacă aceasta este capabilă să furnizeze curenți de valori mari pentru diverse aplicații. Următoarea diagramă Ragone prezentată în **Fig.1.4** arată variațiile densității masice de energie [Wh/kg] în funcție de densitățile masice de putere [W/kg] necesare în diferite aplicații, corespunzătoare câtorva tehnologii de stocare a energiei, inclusiv celule de combustie și motoare cu ardere internă.

Densitatea masică de energie [Wh/kg] este o măsură a cât de multă energie poate înmagazina o baterie. Cu cât este mai mare densitatea de energie, cu atât va fi mai lung timpul de funcționare al bateriei. Bateriile Li-ion cu catodul pe bază de cobalt au cea mai mare densitate de energie [1.10].

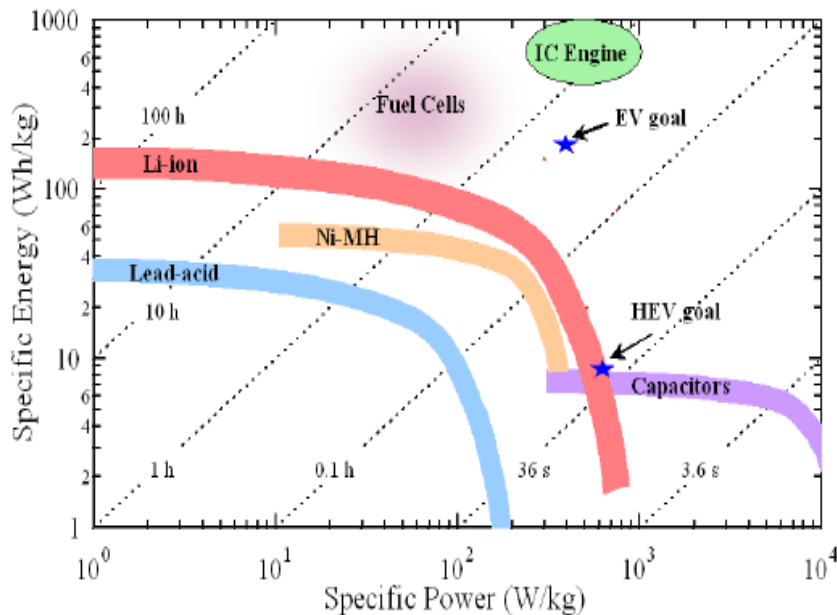


Fig.1.4 Diagrama Ragone pentru diferite soluții tehnologice de stocare a energiei [1.3]

Se poate observa din **Fig.1.4** că tehnologia Li-ion prezintă caracteristici mai bune decât cea cu plumb sau NiMH atât în ceea ce privește energia cât și puterea pentru o greutate dată a bateriei. Se poate observa de asemenea că pentru necesități de putere foarte mari condensatoarele sunt mai indicate decât bateriile electrochimice dar capabilitățile acestora de stocare a energiei sunt foarte limitate. Diagrama Ragone din **Fig.1.4** arată o caracteristică tipică tuturor bateriilor: energia disponibilă descrește puternic când sunt necesare în exterior puteri foarte mari. Aceasta se datorează scăderii semnificative a tensiunii bateriei, și deci apare o creștere a pierderilor de putere când aceasta este descărcată cu curenți foarte mari.

Necesitățile de energie electrică pentru vehiculele hibride diferă de cele pentru vehiculele pur electrice iar aceste necesități influențează designul celulei și al

bateriei. Pentru vehiculele electrice trebuie stocată o cantitate de energie mare pentru ca acestea să se poată deplasa pe o distanță mai mare. Energia stocată în baterii are același rol ca și combustibilul din rezervor în cazul unui vehicul obișnuit. Pachetele de baterii pentru vehiculele electrice stochează aproximativ 35 [kWh], și furnizează energie roților cât aproximativ 15 litri de benzină. Este posibil să se stocheze în baterii câtă energie se dorește prin creșterea numărului acestora, dar aceasta duce la creșterea în greutate a vehiculului. De aceea este esențial să se caute soluții pentru creșterea densității de energie pentru bateriile folosite la alimentarea vehiculelor electrice.

Celulele de tip Li-ion pot fi produse având o densitate de energie volumică de 175 [Wh/l] (densitatea de energie masică 144 [Wh/kg]), cu perspective de a se ajunge până la 310 [Wh/l]. Bateriile cu plumb în mod normal ajung la densități de energie de până la 73 [Wh/l].

Pentru vehiculele hibride, unde principala sursă de putere este combustibilul lichid, cerințele pentru baterii se referă la furnizarea suplimentară de putere pentru o accelerare rapidă. Deci în cazul acestor tipuri de baterii puterea specifică sau densitatea de putere trebuie maximizată. Celulele de tip Li-ion de mare putere ajung în mod curent la o putere specifică mai mare decât 1300 [W/kg] și la o densitate de putere mai mare decât 2700 [W/l].

1.4 Caracteristici de funcționare a bateriilor

A. Efectul Peukert

Bateriile sunt etichetate după capacitatea lor nominală, sarcina electrică, în [Ah]. Peukert a studiat în 1899 capacitatea disponibilă a bateriei cu plumb. Studiul a arătat ca aceasta descrește substanțial cu creșterea curentului de descărcare a bateriei, deci cu creșterea vitezei de descărcare a bateriei. În numeroase aplicații curentul de descărcare necesar este mult mai mare decât curentul nominal al bateriei specificat de producător, caz în care capacitatea disponibilă a bateriei descrește considerabil. Acesta este așa numitul "efect Peukert". În **Fig. 1.5** este prezentată diagrama pentru o celulă de tip Li-ion Sony 26650. Capacitatea descărcată maximă se obține pentru curentul nominal al celulei de 2,5[A]. Celula a fost considerată complet descărcată când tensiunea la bornele ei a scăzut până la valoarea de 2,5 [V].

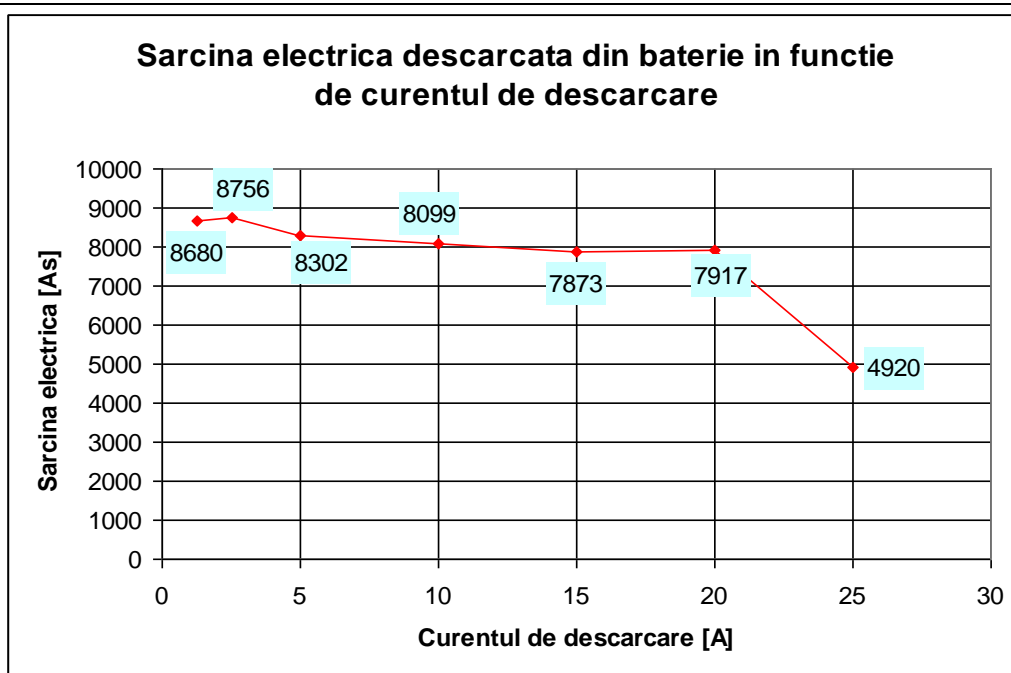


Fig. 1.5 Capacitatea descărcată dintr-o celulă Li-ion Sony 26650 pentru diferiți curenți de descărcare la temperatură constantă 25° C

B. Efectul de memorare

Un alt efect ar fi de memorare, care este binecunoscut la bateriile Ni-Cd și parțial la cele NiMH. Dacă bateria NiCd nu este complet descărcată în mod regulat, apare o "amintire" a celei mai mici stări de încărcare din ciclul anterior și

aceasta nu va mai putea furniza suficientă putere sub această stare de încărcare. Deci bateriile de tip NiCd necesită o descărcare completă din când în când. Acest lucru este foarte neplăcut pentru utilizator.

Unul din succesele bateriilor de tip Li-ion în aplicațiile portabile se datorează faptului că acestea nu prezintă efect de memorare. Ele pot fi depozitate și utilizate în orice stare de încărcare [1.10].

C. Îmbătrânirea bateriei

Bateriile de diferite tipuri se comportă diferit datorită procesului de îmbătrânire. Înțelegerea procesului de îmbătrânire a bateriilor se poate deduce din înțelegerea principiilor fundamentale de funcționare a bateriilor.

Bateriile de tip NiCd suferă de efectul de memorare dacă nu sunt descărcate complet din când în când. Ciclurile de încărcare/descărcare mențin cristalele mici iar acest fapt face ca suprafața electrozilor să fie mai mare, deci acestea vor avea o impedanță mai mică și o putere mai mare.

Bateriile cu plumb prezintă o comportare diferită față de cele de tip NiCd. Bateriile cu plumb se degradează datorită procesului de sulfatare dacă sunt ținute la o stare de încărcare mică. Acest proces ia naștere și dacă bateria nu este reîncărcată complet. În mod normal, în timpul funcționării nu este suficient timp pentru completa încărcare a acesteia. Aceasta subîncărcare este principala cauză de degradare la bateriile cu plumb.

Procesul de îmbătrânire depinde de asemenea de tipul de aplicație în care este utilizată bateria. Aplicații diferite prezintă caracteristici de utilizare diferite ale bateriilor. Bateriile cu plumb suferă de probleme diferite dacă sunt utilizate în aplicații statice, în comparație cu cele utilizate în aplicații de tracțiune de exemplu. În aplicațiile statice (UPS) bateria este ținută complet încărcată tot timpul. Celulele îmbătrânesc repede datorită coroziunii și uscării, care sunt rezultatul procesului de electroliză și al degajării de gaz; în acest caz tensiunea de încărcare a bateriei nu ar trebui să fie prea mare. Tensiunea de încărcare optimă pentru bateriile cu plumb nu depinde numai de aplicație, dar și de temperatură și de gradul de îmbătrânire al celulei. Ținând seama de faptul că o baterie constă din mai multe celule conectate în serie, încărcarea bateriei cu plumb la o tensiune corectă poate fi o problemă dificilă în special datorită diferențelor de temperatură din interiorul bateriei.

Principiul de funcționare al bateriilor de tip Li-ion se bazează pe faptul că ionii de litiu se mișcă înainte și înapoi și nu există mișcări ale materiei în interiorul soluției. Îmbătrânirea bateriei apare datorită unuia sau mai multor din procesele următoare [1.8]:

- tensiuni în materialul electrodului ca rezultat al expansiunii/contractiei cauzată de intercalarea de ioni de litiu în timpul încărcării/descărcării bateriei;

- creșterii grosimii interfeței solid – electrolit (SEI) și consumului de ioni de litiu pentru că interfața solid - electrolit se deteriorează când este străbătută de ionii de litiu. Interfața solid-electrolit crește la loc instantaneu dar își mărește grosimea la poziția la care s-a produs deteriorarea. O interfață de grosime mai mare duce la performanțe scăzute. Capacitatea aparentă a bateriei scade datorită creșterii impedanței și acest proces poate fi mult mai important decât descreșterea capacității bateriei datorită consumului de litiu, în special în aplicațiile de mare putere.

- moleculele solventului se pot "co-intercala" împreună cu ionii de litiu în structura gazdă și ca urmare pot deteriora structura suprafeței, împiedicând intercalarea altor ioni de litiu. Aceasta va duce la reducerea capacității bateriei asemănătoare cu cea produsă de procesul de descreștere a suprafeței active a electrozilor.

- decompoziția electrolitului;

- depunerea litiului și formarea de interfață solid-electrolit la electrodul negativ spre sfârșitul procesului de încărcare a bateriei;

Nu se cunosc procese de îmbătrânire care implică mărirea structurii cristaline, proces care este cauza sulfatării în bateriile cu plumb.

Până acum longevitatea bateriilor mici de tip Li-ion utilizate în aplicațiile portabile nu a fost o preocupare pentru firmele producătoare. Pentru bateriile mari și costisitoare procesul de îmbătrânire și durata de viață a acestora sunt probleme importante. Spre deosebire de bateriile cu plumb pentru care este relativ cunoscută durata de funcționare pentru diverse aplicații, procesul de îmbătrânire la bateriile de tip Li-ion este încă puțin studiat. Aceasta se datorează faptului că bateriile mari de tip Li-ion nu sunt disponibile pe scară largă. Doar câțiva producători pot furniza informații în legătură cu condițiile de exploatare concrete, iar aceste informații nu sunt bazate pe un număr foarte mare de teste. Variantele de celule se schimbă mai repede decât pot fi efectuate testele. Nu există o "ecuație" generică pentru descrierea procesului de îmbătrânire sau a duratei de viață a bateriei și care să ia în considerare toate condițiile de exploatare și cerințele aplicației.

Unele tipuri de baterii suferă de "moarte subită" când ajung la sfârșitul perioadei de viață. Bateriile cu plumb, de exemplu, pot suferi un scurtcircuit intern după o anumită perioadă de funcționare și pot să nu mai funcționeze subit. Celulele

de tip Li-ion sunt supuse unui proces de îmbătrânire monoton și predictibil. Capacitatea bateriei și performanțele ei descresc treptat de-a lungul ciclurilor de funcționare.

Pentru a ilustra fenomenul, în **Fig.1.6** este prezentată capacitatea de descărcare a unei baterii de tip Li-ion în funcție de numărul de cicluri de încărcare/descărcare. După cum se poate observa, curba de degradare are un punct în care viteza de degradare a bateriei crește. Poziția exactă a acestui punct variază în funcție de tipul de baterie și de condițiile de funcționare.

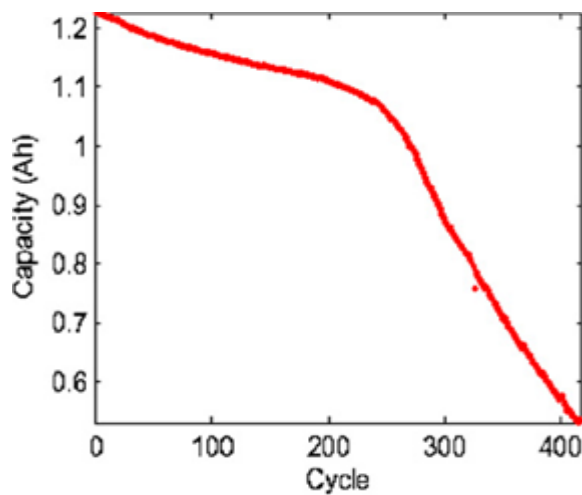


Fig.1.6 Capacitatea de descărcare a unei baterii de tip Li-ion[1.6]

D. Managementul termic al bateriei

Multe tipuri de baterii ridică probleme legate de temperatură. Ele se degradează rapid la temperaturi ridicate și unele din ele se încălzesc semnificativ în timpul descărcării. De asemenea o încălzire substanțială poate apărea spre sfârșitul încărcării bateriei datorită reacțiilor care au loc la supraîncărcarea bateriei, aceasta poate duce la creșterea necontrolată a temperaturii și la distrugerea bateriei. În aceste cazuri este necesar un sistem de răcire a bateriei [1.7].

Celulele de tip Li-ion sunt foarte eficiente și ele nu generează așa multă căldură. De fapt, procesele termodinamice fac ca acestea să se răcească ușor în timpul încărcării. Pe de altă parte celulele de tip Li-ion au o masă termică mică, ceea ce înseamnă că se încălzesc mai ușor, chiar dacă acestea generează pierderi mai mici. În plus, acestea sunt sensibile la temperaturi mari.

Bateriile care conțin electroliti pe bază de apă pot îngheța și carcasa se poate crăpa la temperaturi foarte coborâte. Aceasta este o problemă binecunoscută pentru bateriile cu plumb aflate în stare de descărcare care au o concentrație mică de acid. Solventul organic din celulele de tip Li-ion nu îngheață până la temperaturi de -40°C sau chiar mai scăzute, depinzând de amestecul de solvenți conținut în acestea.

Performanțele unor baterii devin foarte scăzute la temperaturi mici. Pentru celulele de tip Li-ion este dificil să se vorbească în general de performanțele la temperaturi scăzute, dar este posibil să se proiecteze celule de tip litiu-polimer cu performanțe bune la temperaturi scăzute. Este deci important să se testeze pentru fiecare tip de baterie Li-ion performanțele la temperatură scăzută [1.8].

E. Emisia de gaze toxice

Bateriile cu plumb generează emisii de hidrogen gazos spre sfârșitul procesului de încărcare. Hidrogenul este un gaz exploziv chiar și în concentrații mici și din această cauză sunt prevăzute reguli stricte și norme de utilizare legate de ventilația acestora și protecția împotriva exploziilor în diverse aplicații. Celulele de tip litiu-ion sunt complet sigilate, nu există emisii de gaze și deci nu există riscuri de explozie. Celulele de tip Li-ion nu necesită ventilație, deci acestea pot fi montate în containere sigilate. Celulele de tip litiu-polimer sunt nu numai complet sigilate, dar ele nu conțin volume compresibile, ceea ce înseamnă că ele pot fi utilizate sub presiuni foarte mari [1.6].

F. Comportarea bateriilor în cazul supraîncărcării sau descărcării excesive

Bateriile cu plumb și cele de tip NiCd sunt mai permissive în ceea ce privește supraîncărcarea și descărcarea excesivă. Ele ar putea să nu sufere semnificativ în urma acestor abuzuri, aceasta depinzând de gradul și durata suprasolicitării. Celulele de tip Li-ion sunt sensibile la suprasolicitări, acestea putând cauza aprinderea celulei. Pentru protecția fiecărei celule de tip Li-ion este necesar un circuit de protecție suplimentar sau un sistem de management al utilizării bateriei.

G. Siguranța în exploatare

În celulele de tip Li-ion nu există litiu metalic înalt reactiv. Litiul metalic se poate depune la electrodul negativ doar când celula a fost supraîncărcată. Acest litiu metalic depus la electrodul negativ reacționează instantaneu cu electrolitul și face ca să crească stratul interfață solid-electrolit (SEI), fără a compromite siguranța celulei. Trebuie menționat că în cazul în care această depunere are loc la viteze mari de încărcare a celulei (supraîncărcare cu curent mare) această reacție poate produce suficientă căldură care să inițieze ambalarea termică a celulei. Separatorul va manifesta caracteristica de blocare, ceea ce înseamnă că va stopa transferul de ioni de litiu prin el în momentul în care temperatura în interiorul celulei atinge un anumit nivel. Aceasta va stopa atât supraîncărcarea cât și celelalte reacții. Dacă procesul are suficient impuls termic și temperatura continuă să crească în ciuda blocării proceselor, separatorul se va distruge. Pierderea integrității de către separator poate duce la scurtcircuit intern pentru că electrozii pozitiv și negativ se pot atinge. Aceasta va duce la o reacție exotermică rapidă, solventul va lua foc, ceea ce va duce la o degajare de căldură mai mare și la intensificarea reacțiilor. O supapă de siguranță se va deschide pentru a preveni generarea unei presiuni mari în interiorul celulei. Celula nu va exploda, dar va lua foc ceea ce duce la aprinderea și celorlalte celule învecinate [1.3].

Inversarea polarității cu curenți mari poate genera același scenariu. Spre deosebire de arderea lichidelor, focul va arde doar în interiorul bateriei și nu se va extinde.

Pentru motivele prezentate anterior este esențial să se protejeze fiecare celulă în parte împotriva suprasolicitărilor. Circuitele electronice de protecție și management sunt necesare pentru fiecare dintre celulele bateriilor conectate în serie.

1.5 Construcția și funcționarea celulelor de tip Li-ion

1.5.1 Construcția unei celule de tip Li-ion

Construcția unei celule tipice de tip Li-ion poate fi ilustrată după cum este prezentat în **Fig.1.7** de mai jos [1.3]:

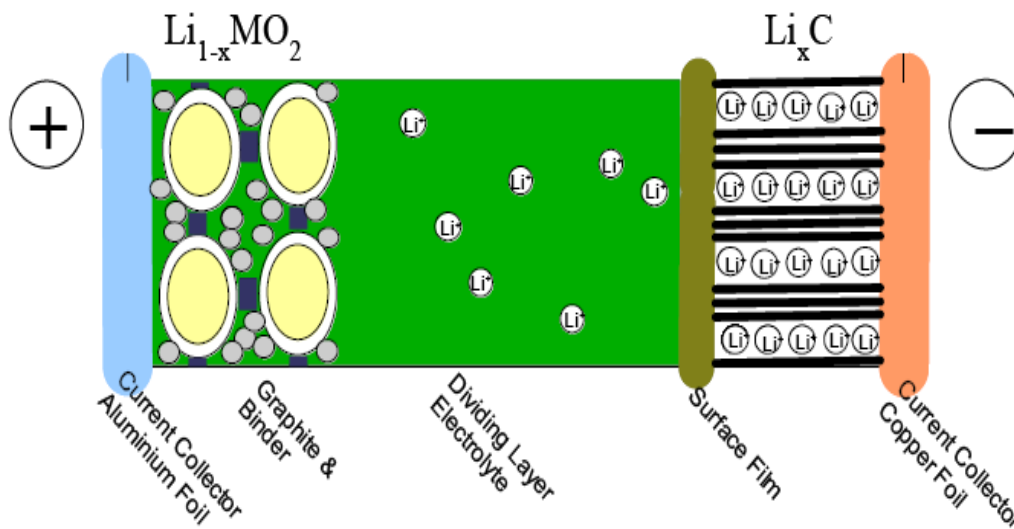


Fig. 1.7 Modelul de construcție al unei celule de tip Li-ion[1.3]

În **Fig.1.7** sunt prezentate cele mai importante caracteristici structurale ale unei celule de tip Li-ion. De la stânga la dreapta, se pot vedea colectorul de curent și materialul activ ale electrodului pozitiv, apoi electrolitul, suprafața despărțitoare (separatorul) și în dreapta materialul activ și colectorul de curent al electrodului negativ.

Datorită tensiunii mari a celulei de tip Li-ion (3.6 [V] tensiune nominală), alegerea materialelor pentru colectori de curent este limitată la aluminiu pentru electrodul pozitiv și la cupru pentru cel negativ. În mod normal, materialul din care este realizat terminalul este același cu cel din care este realizat electrodul pentru a nu exista diferențe de potențial între aceste materiale și a nu apărea riscul coroziunii în interiorul celulei. Stabilirea conexiunilor trainice și de mare siguranță, în special în cazul electrodului de aluminiu/borna bateriei, poate ridica probleme și trebuie avută în vedere pentru o testare pe termen îndelungat.

Electrolitul este un solvent organic având în soluție o sare de litiu. Electrolitul nu este conductiv din punct de vedere electric, dar permite transportul ionilor de litiu. Există o serie de solvenți adecvați pentru celulele de tip Li-ion. De multe ori, mai mulți solvenți diferiți sunt amestecați în proporții diferite și posibil se mai adaugă aditivi pentru a ajunge la caracteristicile dorite. În mod normal, formula este optimizată pentru utilizări extinse generale. Formula poate fi optimizată și pentru aplicații specifice.

În timpul încărcării, ionii de litiu se mișcă prin electrolit de la electrodul pozitiv la cel negativ; în timpul descărcării ei mișcându-se în sens invers. Ei nu formează o fază solidă de metal de litiu, care să trebuiască apoi să se întoarcă în soluție. În nici o fază a procesului nu se formează metal de litiu. Doar ionii se mișcă înainte și înapoi, fapt care a dus la denumirea de "balansoar" pentru baterie. Cinetica reacțiilor din celulele de tip Li-ion este mult mai rapidă decât cea din bateriile cu plumb, dar mobilitatea ionilor în interiorul electrolitului este în comparație mai mică și aceasta este cauza din care primele celule de tip Li-ion nu au fost foarte puternice. În prezent, distanța parcursă de ioni prin electrolit este menținută foarte mică și deci sunt disponibile și baterii de puteri mari. Acest lucru se realizează prin utilizarea unui strat foarte subțire de material în care este absorbit electrolitul. Electrolitul mai poate fi conținut și într-un strat foarte subțire de polimer.

Ambii electrozi sunt alcătuiți din multe particule mici care pentru electrodul pozitiv sunt de tip oxid metalic de litiu care sunt "lipite" împreună și de colectorul de curent folosind un liant. Un material de umplutură conductiv (de ex. grafit) este utilizat pentru a crește conductivitatea între particule. Electrodul negativ este realizat într-un mod similar, cu excepția faptului materialului de umplutură nu mai este necesar din cauză că particulele sunt ele însele din material conductiv (de ex. grafit, cărbune). Se pot îmbunătăți performanțele celulei prin controlarea mărimii particulelor, menținându-le de dimensiuni mici pentru a mări aria suprafeței electrodului și reducând distanța parcursă de ionii de litiu printre particule. Materialul activ (particulele) pot conține un număr limitat de ioni de litiu. Aceștia se pot mișca în interiorul straturilor de particule. Acesta este motivul pentru care materialul activ conținând ioni de litiu intercalați mai este denumit "soluție solidă".[1.4]

Anodul este electrodul la care decurge reacția de oxidare. Dacă celula se află în proces de descărcare (funcționează ca element galvanic) anodul este electrodul negativ. În timpul încărcării celulei (celula de electroliză) anodul este electrodul pozitiv.

Catodul este electrodul la care se produce reacția de reducere. În timpul descărcării celulei catodul este electrodul pozitiv iar în timpul încărcării acesteia catodul este electrodul negativ.

În continuare se consideră celula electrochimică funcționând ca element galvanic și în consecință anodul este electrodul negativ iar catodul cel pozitiv.

A. Catodul

Materialul utilizat pentru catod (electrodul pozitiv) este un oxid de metal în care ionii de litiu sunt inserați sau intercalați în structura cristalină. Bateriile mici, comerciale, în general sunt realizate din LiCoO_2 , dar cobaltul este destul de scump și de aceea se încearcă înlocuirea lui cu un material mai ieftin. Pentru bateriile utilizate în industria automobilelor s-au dezvoltat baterii care utilizează nichel și mangan. Bateriile cu catod pe bază de nichel sunt disponibile în prezent, dar cele pe bază de mangan sunt în fază de cercetare/dezvoltare, cu probleme majore legate de solubilitatea materialului în electrolit, în special la temperaturi înalte.

Diferitele materiale din care este realizat catodul au diferite capacități de a transporta curentul, acest lucru afectând capacitatea de stocare a celulei (vezi tabelul.1.4) [1.2]:

28 Stadiul tehnologic și performanțele acumulatorilor electrice - 1.

Tab.1.4 Materiale din care este realizat catodul

Materialul catodului	Capacitatea specifică [mA*h/g]	
	Practică	Teoretică
LiCoO ₂	140	275
LiNiO ₂	190-200	274
LiMn ₂ O ₄	120	148

Proprietățile electrice teoretice ale celulelor și bateriilor sunt date de tipurile de materiale active care compun celula sau bateria (acestea determină tensiunea) și de cantitatea de materiale active care sunt utilizate (acestea determină capacitatea bateriei în amperi-oră). În mod practic, doar o parte din energia teoretică a bateriei este realizată, deoarece în baterie pe lângă materialele active mai există și electrolit și componente neactive (carcasă, separator, electrozi) care se adaugă greutateii și volumului bateriei. Un alt factor care contribuie la scăderea densității de energie a bateriei este tensiunea în timpul descărcării bateriei este sub cea teoretică și bateria nu este descărcată complet la 0 [V]. De asemenea, într-o baterie obișnuită materialele nu sunt într-un echilibru stoichiometric. Excesul de un tip de material activ din interiorul bateriei reduce densitatea de energie a acesteia.

Creșterea densității de energie pentru nichel în comparație cu cea pentru cobalt are loc deoarece pentru cobalt doar 50% din ionii de litiu pot fi transportați înainte și înapoi între electrozi. Materialul devine mai puțin stabil pe măsură ce tensiunea de încărcare a bateriei crește (valoarea maxima a acestei tensiuni este în jur de 4.7 [V]). La bateriile care au catodul pe baza de nichel aproximativ 70% din ionii de litiu pot fi transportați la o tensiune de 4.2 [V]. Problema cea mai mare este legată de stabilitatea materialului. Datorită faptului că nichelul este mai puțin stabil decât cobaltul, cercetătorii caută să găsească soluții pentru a face materialele pe bază de nichel mai stabile.

Un material tipic pentru realizarea catodului este LiNi_{0.8}Co_{0.2}O₂. Modificând materialul catodului de la 100% Co la 80% Ni și 20% Co s-a obținut o creștere a capacității de stocare a bateriei cu 24% și o reducere a costurilor cu aproximativ 20%. Nichelul și cobaltul sunt similare ca proprietăți, astfel ca dimensiunile și cantitățile de material nu se modifică.

Materialele din care sunt realizați electrozii sunt depuși pe o foiță metalică subțire, care servește ca și colector de curent (vezi **Fig.1.8**). Pentru catod se folosește foița de aluminiu (aproximativ 20 micrometri).



Fig.1.8 Folii colectoare de curent [1.2]

B. Anodul

Anodul sau electrodul negativ, este în general realizat din grafit, depus pe o foiță de cupru de aproximativ 14 microni grosime. Se pot utiliza și alte forme de carbon.

În cazul anodului realizat din grafit, un singur ion de litiu se poate intercala în fiecare hexagon al structurii moleculare de grafit, LiC_6 . Capacitatea teoretică a grafitului este 372 [$\text{mA}\cdot\text{h/g}$]. Se caută alte structuri care să permită intercalarea mai multor ioni de litiu pentru 6 atomi de carbon. O soluție ar fi dislocarea planurilor de carbon și dispunerea lor oblică sub forma unui castel din cărți de joc care permite intercalarea în medie a doi ioni de litiu pentru 6 atomi de carbon. Cele mai bune structuri de carbon permit intercalarea a 2.5 ioni de litiu pentru 6 atomi de carbon și ajung la capacitatea de 750 [$\text{mA}\cdot\text{h/g}$]. Deci se va utiliza mai puțin material pentru anod pentru a se potrivi cu capacitatea dată a catodului. O altă direcție de cercetare s-a realizat în scopul utilizării oxizilor metalici ca materiale pentru realizarea anozilor, care oferă o capacitate de stocare a curentului de până la 10 ori mai mare decât carbonul, dar din nefericire aceste materiale nu sunt suficient de stabile. Datorită faptului că materialul anodului este mult mai ieftin în comparație cu cel al catodului, eforturile de cercetare în aceasta direcție nu sunt atât de intense.

În timp ce este căutat carbonul cu porozitate maximă, este necesar ca suprafața efectivă a acestuia ($<10\text{m}^2/\text{g}$) să fie minimă pentru a minimiza decompoziția acestuia de către electrolit. În unele cazuri pe suprafața acestuia este depusă o peliculă subțire de nichel sau alt metal pentru a-l proteja. Amestecul de grafit cu carbon ne-grafitic oferă o soluție atât pentru îmbunătățirea capacității de stocare a anodului cât și pentru reducerea descompunerii acestuia.

C. Separatorii

Fie că sunt folosiți pentru baterii de tip Li-ion de energii mari sau de puteri mari, separatorii uzual sunt realizați din polipropilenă sau polietilenă (PP/PE) folosind straturi de grosime 3 până la 8 microni cu porozitatea 50% (vezi **Fig.1.9**).

Separatorii îndeplinesc doua funcții: nu doar țin separați electrozii pozitiv și negativ, dar servesc ca dispozitiv de siguranță în cazul în care celula devine prea fierbinte. Polimerii cu temperatura de topire scăzută se topesc închizând porii prin care circulă ionii, astfel întrerupând curentul celulei. Este de preferat ca funcționarea celulei să fie întreruptă de circuitele de reglare și nu de topirea polimerilor pentru că aceasta nu mai poate fi utilizată din moment ce separatorul s-a topit.



Fig.1.9 Materialul separatorului [1.2]

D. Electrolitul

Uzual electrolitul este o soluție 1-molar de sare de litiu într-un solvent organic. Sărurile luate în considerare sunt listate în tabelul.1.5 [1.2]. De notat că sărurile sunt compuși cu fluoruri, ceea ce explică atât costurile de producție, cât și pericolul potențial în caz de incendiere. Deși aceste săruri sunt foarte scumpe, ele se folosesc în soluții foarte diluate în solvenți ieftini. Unul dintre producătorii de baterii folosește un amestec de 6 solvenți, crescând costurile, dar bateriile de acest tip pot furniza curent maxim de 60C (60*curentul nominal) în comparație cu curenți de 5C care se obțin uzual, astfel îmbunătățind siguranța în utilizarea bateriei.

Cercetările din domeniul electroliților se îndreaptă spre găsirea unei soluții de electrolit care să inhibe focul. Se dorește găsirea unor aditivi care să inhibe focul, mai degrabă decât înlocuirea solvenților organici. Au fost investigați lichizi ionici cum ar fi 1-etil-3-metilimidazolium pentru a fi utilizați ca electroliți. Ei au conductivitate ionică mare, nu sunt inflamabili, sunt necorozivi și sunt sub forma de gel.

Tab.1.5 Săruri de litiu [1.2]

Denumire	Formula
Litiu hexafluoroarsenate	LiAsF_6
Litiu hexafluorophosphate	LiPF_6
Litiu tetrafluoroborate	LiBF_4
Litiu (bis)trifluoromethanesulfonimide	$\text{LiN}(\text{SO}_2 \text{CF}_3)_2$
Litiu tris(trifluoromethanesulfonyl)methide	$\text{LiC}(\text{SO}_2 \text{CF}_3)_3$
Litiu trifluoromethnesulfonate	$\text{LiCF}_3 \text{SO}_3$

Numeroase direcții de cercetare au avut ca scop dezvoltarea electroliților de tip gel sau polimerilor solizi pentru bateriile de tip Li-ion. Electroliții solizi oferă o serie de avantaje cum ar fi exploatare mai sigură (nu există electrolit lichid care să curgă), sunt mai ușoare și oferă posibilitatea unui design mai variat. Reducerea în greutate este foarte importantă pentru bateriile de dimensiuni mici. Dezavantajele electrolitului solid sunt legate de faptul că acesta are o rezistență mai mare și deci există dificultăți în a atinge performanțele cerute.

În tabelul.1.6 [1.2] de mai jos sunt prezentate materialele care intră în compoziția unei celule de tip Li-ion și cantitățile estimate ale acestor materiale:

Tab.1.6 Estimarea cantităților de materiale dintr-o celulă de tip Li-ion [1.2]

Materialul/component a	Celule de energie mare		Celula de putere mare	
	Cantitate (g)	Procent din greutate[%]	Cantitate (g)	Procent din greutate[%]
Electrodul negativ (uscat)				
Materialul anodului (grafit)	536.6	16.4	14.1	4.3
Liantul (PVDF)	69.7	2.0		
Colectorul de curent (Cu)	151.9	4.4	41.6	12.8
Catodul (uscat)				
Materialul activ	1408.6	41.0	74.4	22.9
Carbon	46.4	1.4		
Liantul (polyvinilidene fluoride)	92.9	2.7		
Colectorul de curent (Al)	63.0	1.8	19.4	6.0
Restul celulei				
Conectori, capetele celulei,	66.2	1.9	32.2	10.2
Miezul celulei	0.9	0		
Carcasa	291.0	8.5	70.1	1.6
Electrolitul	618	18.0	44.0	13.5
Separatorii	60.5	1.8	16.4	5.0
Altele			12.6	3.9
Total	3432.7	99.9	325	100

E. Asamblarea celulei

Majoritatea celulelor folosite în industria automobilelor sunt de formă cilindrică, deși unii producători realizează și celule prismatice. Carcasa celulelor de tip Li-ion inițial se făcea din oțel inoxidabil, dar în prezent se folosește preponderent aluminiul, care este și mai ușor și mai ieftin. Utilizarea plasticului este problematică, deoarece acesta poate fi dizolvat de electroliții organici. Dacă s-ar utiliza electroliții din polimeri solizi nu ar mai fi necesare carcusele rigide din metal. S-ar putea utiliza folii de aluminiu sau de polimeri metalizați, iar celulele ar putea fi realizate în diverse forme. Materialele ar trebui să fie suficient de dure cât să treacă teste de rezistență mecanică. În **Fig.1.10** este prezentată structura unei celule cilindrice de tip Li-ion.

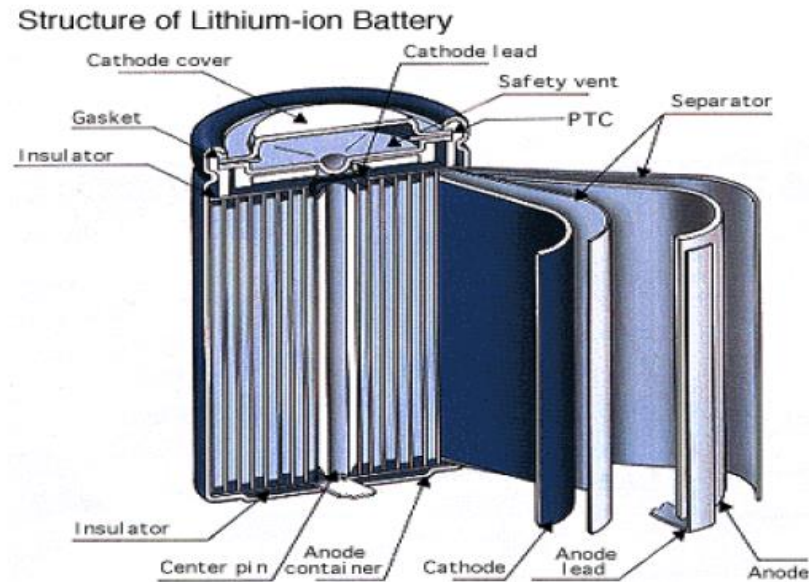


Fig 1.10 Structura unei celule de tip Li-ion cilindrică [1.2]

F.Circuitele de siguranță

Celulele de tip Li-ion necesită un circuit de protecție care să prevină supraîncărcarea sau descărcarea excesivă a lor. În principiu același circuit se folosește și pentru bateriile utilizate în mașini și pentru cele pentru consumatori mai mici.

Bateriile de tip Li-ion necesită o protecție specială în timpul încărcării și descărcării și în condiții de solicitare extremă. Deoarece aceste baterii nu dispun de un mecanism propriu de echilibrare și reglare, ele au nevoie de un sistem activ extern, în special când mai multe celule sunt conectate în serie, cum este cazul automobilelor electrice. Circuitul extern de protecție constă în principal dintr-un circuit bypass reglat de un microcip. Când una dintre celule atinge o stare de încărcare (sau de descărcare) înaintea celorlalte circuitul bypass este activat întrerupând procesul de încărcare (sau de descărcare) a celulei până la restabilirea echilibrului între celule. Starea de încărcare a celulelor de tip Li-ion poate fi detectată prin măsurarea tensiunii celulei, pentru că există o corelație foarte bună între starea de încărcare și tensiunea de mers în gol a bateriei. Circuitul de protecție sesizează valoarea tensiunii celulei și activează sau dezactivează circuitul de protecție când celula este complet încărcată sau descărcată. În acest fel se păstrează echilibrul între toate celulele și este evitată distrugerea individuală a vreunei celule prin supraîncărcare sau descărcare excesivă. În plus, sistemul de protecție monitorizează și temperatura bateriei și activează sistemul de răcire (de ex. ventilare); sistemele de protecție de asemenea oferă protecție împotriva scurtcircuitelor sau a altor fenomene tranzitorii.

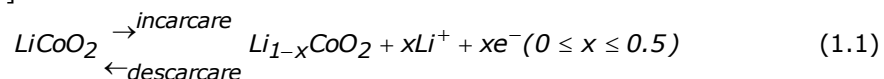
În cazul folosirii necorespunzătoare a bateriei sau în cazul unui defect, celulele de tip Li-ion pot fi supuse unor curenți de valoare mare. În asemenea situații alte dispozitive de siguranță pot proteja celula în scopul de a limita defectele. Multe celule au un dispozitiv de limitare a curentului care este dispus în serie cu electrozii.

Acest material cu coeficient pozitiv de temperatură (PTC) constă dintr-un amestec de polimeri speciali și componente conductive care au structură cristalină și au rezistență electrică mică la temperatura camerei. La curenți mari cresc pierderile pe rezistența internă a celulei și deci va crește și temperatura, ceea ce va duce la creșterea rezistenței materialului PTC, controlând rapid curentul de valoare mare. Aceste dispozitive nu pot fi utilizate la celulele de putere mare. Adicional pot fi folosite supape de siguranță care se deschid dacă presiunea din interiorul celulei depășește o valoare predefinită și lasă excesul de gaz să se elimine într-un mod controlat. De asemenea, stratul de polietilenă din filmul separator se topește când temperatura din interiorul bateriei depășește o anumită limită, închizând microporii și nepermițând schimbul de ioni în interiorul celulei. Astfel se întrerupe funcționarea celulei. Acționarea ultimelor două tipuri de sisteme de siguranță nu este reversibilă, celula nu mai poate fi folosită în continuare, dar se limitează daunele și eventualele aprinderi ale electrolitului [1.3].

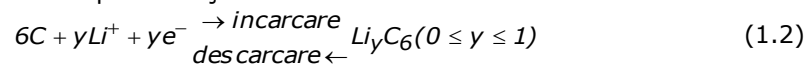
1.5.2 Fenomenele chimice din celulele de tip Li-ion

Materialul din care este realizat electrodul pozitiv dintr-o baterie de tip Li-ion este în mod obișnuit oxid al unui metal (LiMO_2 , $M=\text{Co, Ni, Mn}$), având o structură fie stratificată, fie tunelară. Materialul din care este realizat electrodul negativ este carbon grafitic care are o structură stratificată. Electrolitul bateriei de tip Li-ion acționează ca o cale ionică între electrodul pozitiv și cel negativ. În timpul proceselor de încărcare/descărcare ionii pozitivi de Li sunt inserați sau retrași din spațiul interstițial dintre straturile atomice înăuntrul materialului activ. Aceste procese sunt explicate în cele ce urmează, considerând materialul din care este realizat electrodul pozitiv LiCoO_2 iar materialul din care este realizat electrodul negativ grafitul.

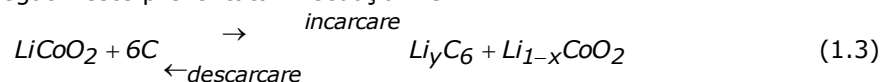
În timpul funcționării bateriei ionii pozitivi de Li sunt extrași din LiCoO_2 în timpul încărcării prin procesul de oxidare electrochimică și sunt inserați în LiCoO_2 în timpul descărcării prin procesul de reducere, după cum este indicat în ecuația de mai jos [1.4]:



La electrodul negativ grafitul este redus prin intercalarea electrochimică a litiului în timpul încărcării și este oxidat prin extragerea litiului în timpul descărcării. Acest proces este descris prin ecuația 1.2:



Deci, reacția care are loc în interiorul bateriei LiCoO_2 electrodul pozitiv/grafit electrodul negativ este prezentată în ecuația 1.3:



Principiul de funcționare al bateriei secundare de tip Li-ion în **Fig.1.11**. Materialul activ stratificat este depus pe colectorii metalici de curent:

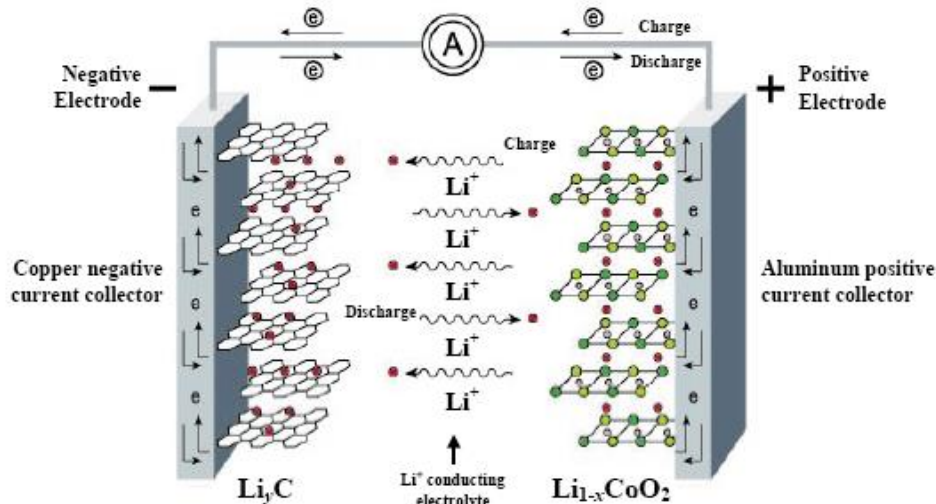


Fig.1.11 Privire de ansamblu asupra proceselor de încărcare și descărcare dintr-o baterie de tip Li-ion[1.4]

1.6 Concluzii

Acest capitol prezintă variantele de acumuloare electrice existente la ora actuală cu principalele lor caracteristici. De asemenea, se efectuează o analiză a diferențelor dintre tehnologiile care stau la baza funcționării acestor acumuloare. Comparând caracteristicile de bază pentru câteva tipuri de acumuloare electrice se observă că cele care au la bază tehnologia Li-ion au cea mai mare densitate masică și volumică de energie și din acest motiv sunt preferate ca sisteme de rezervă pentru stocarea energiei electrice utilizate în industria auto. Tot în acest capitol este prezentată în detaliu construcția unei celule cilindrice de tip Li-ion și principiul de funcționare prin prezentarea fenomenelor chimice care au loc în interiorul celulei în timpul funcționării acesteia.

1.7 Bibliografie

- [1.1] Bergveld H J, Kruijt W S and Notten P H L, *Battery Management Systems, Design by Modelling (Philips Research Book Series)*, vol 1, Boston, MA: Kluwer, 2002;
- [1.2] Center for Transportation Research Argonne National Laboratory United States Department of Energy, *Costs of Lithium-Ion Batteries for Vehicles*, May, 2000;
- [1.3] Doerffel D, *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;
- [1.4] Zhou J, *Lithium Metal Microreference Electrodes and their Applications to Li-ion Batteries*, PhD Thesis, Eindhoven University of Technology, 2007;.
- [1.5] Department of Energy (DOE) Office of Basic Energy Sciences Workshop, *Technology and Applied R&D Needs for Electrical Energy Storage*, March 2007;

-
- [1.6] Pop V, Bervgeld H V, Notten P H L, Regtien P P L, *State-of-the-art of battery state-of-charge determination*, Institute of Physics Publishing, 2005;
- [1.7] Broussely M, Herreyre S, Biensan P, Kasztejna P, Nechev K and Staniewicz R J, *Aging mechanism in Li-ion cells and calendar life predictions* J. Power Sources **97–98** 13–21, 2001;
- [1.8] Spotnitz R *Simulation of capacity fade in lithium-ion batteries* J. Power Sources **113** 72–80, 2003;
- [1.9] IEC 60050(486):1991, *International Electrotechnical Vocabulary (IEV) - Chapter 486: Secondary cells and Batteries*;
- [1.10] D.Linden, T.B.Reddy, *Handbook of Batteries*, third edition, McGraw-Hill, 2002;

2. Metode de diagnosticare a bateriilor

2.1 Utilitatea metodelor de diagnosticare a bateriilor

Bateriile sunt sisteme complexe în interiorul cărora procesele electrochimice, de transport de masă și de sarcină și transformările de fază se modifică atât în timpul ciclului de încărcare/descărcare cât și de-a lungul duratei de viață a acestora. Deși aceste sisteme par simple pentru utilizatori, funcționarea lor în bune condiții depinde de o serie de mecanisme complexe, interconectate, care implică instabilitatea termodinamică pe multe porțiuni ale caracteristicii de încărcare/descărcare și formarea unor faze metastabile. Asigurarea stabilității pe termen lung necesită un control riguros al proceselor chimice și fizice atât în timp cât și pe măsura modificărilor structurale din interiorul bateriei.

Sistemul complex care există în interiorul bateriei implică interacțiuni între stări ale materiei solide cristaline și amorfă și lichide organice. Unele componente cum ar fi electrozii și electrolitul sunt considerate active electrochimic, altele cum ar fi aditivii electric conductivi, lianții, colectorii de curent și separatorii sunt utilizați pentru a menține integritatea electronică și mecanică a electrozilor. Toate aceste componente funcționează și interacționează unele cu altele contribuind la un sistem complicat de reacții interconectate și procese fizico-chimice a căror manifestare se observă în exterior printr-o largă varietate de simptome și fenomene. Aceste fenomene de transfer de sarcină, de transport de sarcină și de masă în interiorul materialului și de-a lungul interfețelor, schimbările structurale și tranzițiile de fază determină principalii parametri ai întregului sistem electrochimic: densitatea de energie, vitezele de încărcare/descărcare, durata de viață și siguranța în exploatare [2.1].

Dispozitivele electronice portabile au devenit omniprezente în societatea modernă, ceea ce a creat necesitatea dezvoltării rapide a tehnologiilor utilizate pentru producerea bateriilor. Buna funcționare a unor astfel de dispozitive portabile necesită existența multor funcții cum ar fi: controlul încărcării bateriei, monitorizarea capacității bateriei, timpul de funcționare rămas în condițiile de utilizare, contorizarea ciclurilor de încărcare/descărcare, etc. O determinare corectă a stării de încărcare a bateriei permite utilizatorului exploatarea acesteia în limitele proiectate, ceea ce va duce la îmbunătățirea performanțelor bateriei, la o creștere a duratei de viață a acesteia. Starea de încărcare a bateriei arată procentual capacitatea rămasă în baterie raportată la capacitatea maximă a bateriei.

De-a lungul duratei de viață a bateriei performanțele sau "sănătatea" ei tind să se deterioreze treptat datorită unor modificări ireversibile fizice și chimice care au loc în timpul utilizării acesteia sau cu trecerea timpului. Starea de sănătate a bateriei este un indicator al punctului care a fost atins în durata de viață a bateriei și o măsură a condiției ei în comparație cu o baterie nouă. Îmbătrânirea bateriei este un proces complex care implică mulți parametri ai acesteia: impedanța, capacitatea electrică, etc.

2.2 Istoricul metodelor de diagnosticare a bateriilor

Sistemele pentru indicarea încărcării bateriilor există aproape de când au apărut bateriile secundare. În 1963 Curtis Instruments a inițiat monitorizarea stării de încărcare a unei baterii cu plumb utilizată pentru pornirea autovehiculului. Una din metodele utilizate de Curtis a fost prezicerea capacității rămase în baterie prin măsurarea perioadei de timp trecute din momentul în care tensiunea bateriei a scăzut sub o anumită valoare [2.2]. De asemenea, este prezentată o metodă de compensare pentru diverși curenți de descărcare.

Din aceeași perioadă de timp, alte sisteme de monitorizare a încărcării bateriilor se bazează pe tensiunea medie a bateriei, cum ar fi de exemplu sistemul Sears de monitorizare a bateriilor (produs de compania Motovator). Dintre toate sistemele de monitorizare din această perioadă, cel elaborat de Curtis a fost cel mai sofisticat și mai precis. O altă metodă de monitorizare patentată de compania Curtis folosește curentul de descărcare a bateriei care este trimis unui modul integrator care afișează permanent starea de încărcare a bateriei și reglează apoi curentul de încărcare al bateriei.

În 1970 Lerner [2.3] a încercat să realizeze un indicator al stării de încărcare a bateriilor NiCd prin utilizarea unei metode de monitorizare a curentului. În cadrul acestei metode curentul exterior al unei baterii având starea de încărcare necunoscută este comparat cu acela al unei baterii cu starea de încărcare cunoscută. Din această comparație se putea deduce starea de încărcare a bateriei necunoscute.

În 1974 York ș.a. au folosit un indicator al stării de încărcare a bateriei prin măsurarea tensiunii bateriei și compararea acesteia cu două nivele de tensiune stocate în sistem [2.4]. Prima stare indică faptul că tensiunea este mai mare decât primul nivel de tensiune, a doua stare indică faptul că tensiunea bateriei este mai mică decât primul nivel de tensiune, dar mai mare decât al doilea nivel de tensiune. În final, a treia stare indica faptul că tensiunea bateriei e mai mică decât al doilea nivel de tensiune și se vor dezactiva consumatorii legați la baterie. Ori de câte ori tensiunea bateriei scade sub o anumită valoare de prag un circuit va detecta acest lucru și va genera un număr de impulsuri. Un contor electronic numără aceste impulsuri și le adună. Ieșirea de la acest integrator va indica starea de încărcare a bateriei. Un principal avantaj al acestei metode este că starea de încărcare este afișată chiar în cazul deconectării și reconectării bateriei.

Acest concept de determinare a stării de încărcare a bateriei pe baza comparării tensiunii măsurate la baterie cu valori de prag predeterminate care corespund diferitelor stări de încărcare predefinite, sunt de asemenea prezentate în [2.5, 2.6]. În [2.5] este prezentat faptul că timpul acumulat total de funcționare al bateriei este funcție de impedanța internă a bateriei. Starea de încărcare a bateriei este determinată față de capacitatea maximă a bateriei. Această aplicație este utilizată în domeniul telefoanelor mobile. În [2.6] se măsoară nivelele de tensiune ale bateriei în timpul încărcării și descărcării acesteia și sunt comparate cu valori predeterminate care sunt modificate funcție de temperatură. Caracteristicile de încărcare și de descărcare stocate sunt împărțite pe porțiuni definite de nivelele de tensiune și de viteza de modificare a acestora. Fiecare porțiune de caracteristică definește o anumită stare de încărcare a bateriei.

În 1974, Brandwein ș.a. au dezvoltat un dispozitiv de monitorizare a bateriilor NiCd [2.7]. În plus față de măsurarea tensiunii mai este măsurat și curentul care intră sau iese din baterie și de asemenea este măsurată și temperatura pentru a estima starea de încărcare a bateriei. În [2.8] este prezentat un circuit electric echivalent al bateriei care utilizează ca intrări măsurările de curent, tensiune și de temperatură. Valorile măsurate sunt comparate cu cele obținute prin calcule cu ajutorul circuitului electric echivalent al bateriei. Parametrii din circuitul echivalent și variabilele de stare sunt modificate în așa fel ca să se potrivească cu valorile măsurate iar starea de încărcare a bateriei se estimează cu ajutorul parametrilor ajustați.

În 1975 Christianson ș.a. au dezvoltat o metodă în care starea de încărcare a bateriei se determină pe baza tensiunii de mers în gol a ei. Tensiunea de funcționare în gol a bateriei (OCV – Open Circuit Voltage) este direct proporțională cu starea ei de încărcare și poate fi calculată utilizând următoarea relație:

$$OCV = U_{term} + I * R \quad (2.1)$$

Unde U_{term} este valoarea tensiunii la bornele bateriei, I este curentul actual al bateriei considerat pozitiv în timpul descărcării și negativ în timpul încărcării iar R este valoarea rezistenței interne a bateriei. De observat că $OCV = U_{term}$ când curentul bateriei $I = 0$, dar după întreruperea curentului bateriei, datorită fenomenelor de relaxare ce au loc în interiorul bateriei, durează un timp până această egalitate are loc. În plus față de măsurarea tensiunii de funcționare în gol a bateriei în 1978 Eby ș.a. au prezentat o altă metodă care utilizează și valoarea tensiunii bateriei în timpul funcționării acesteia pentru a determina starea de încărcare a unei baterii cu plumb în timpul unui ciclu de descărcare. Valoarea inițială a tensiunii de mers în gol este salvată și s-a demonstrat că într-un set de situații bine definite există o relație liniară între valoarea tensiunii de mers în gol și starea de încărcare a bateriei cu plumb. La fiecare moment de timp curentul de descărcare se poate determina comparând caracteristica tensiunii bateriei cu cea a tensiunii de mers în gol.

Primele măsurători ale impedanței interne a bateriei au fost facute în anul 1941 de către Wilihnganz [2.9]. Aceste măsurători implicau alimentarea celulei electrochimice cu o tensiune alternativă de mică amplitudine – aproximativ 5 [mV] și evaluarea componentelor rezistive și reactive sau a altor parametrii cum ar fi modulul impedanței și unghiul de fază. Aceste măsurători cuprind o gamă largă de frecvențe ale semnalului alternativ și se pot analiza o mulțime de parametrii ai bateriei și legați de cinetica reacțiilor din interiorul bateriei [2.9]. În anul 1975 Dowgiallo ș.a. și în anul 1982 Zaugg au dezvoltat o metodă pentru determinarea stării de încărcare a bateriei bazându-se pe măsurarea impedanței [2.10, 2.11], monitorizând continuu unghiul de fază dintre tensiunea alternativă de alimentare a bateriei și curentul prin baterie. Metoda din [2.10] este prezentată pentru bateriile NiCd. În sistemul dezvoltat de Muramatsu în 1985 este utilizată relația dintre impedanța bateriei la diverse frecvențe, capacitatea rămasă în baterie și starea de sănătate a bateriei pentru a detecta starea de încărcare și starea de sănătate a bateriei [2.12]. În tabele de valori sunt stocate valori predefinite bazându-se pe relațiile existente. Tabelele de valori (*look-up tables*) sunt tabele în care sunt trecute valori fixe ale parametrilor mășurați cum ar fi tensiune, curent, impedanță și temperatură, pentru a putea deduce starea de încărcare a bateriei.

În anul 1984 Peled a dezvoltat o metodă de determinare a stării de încărcare a bateriilor de tip Li-ion [2.13]. La baza acestei metode au stat măsurătorile de tensiune și temperatură utilizate ca parametrii de intrare în tabelele de valori. Dupa

aplicarea unui impuls de curent și o scurtă perioadă de pauză, este măsurată tensiunea de mers în gol a bateriei ținând seama și de temperatură. Valoarea de tensiune măsurată este comparată cu valoarea predeterminată din tabelul de valori. Starea de încărcare a bateriei este indicată pe baza acestei comparații. În sistemul dezvoltat de Kopmann în 1987, tensiunea bateriei, curentul și timpul sunt măsurate în timpul fiecărui ciclu de încărcare și de descărcare [2.14]. Aceste valori sunt utilizate ca intrări în tabelele de valori. Caracteristica tensiunii bateriei în timpul procesului de încărcare și de descărcare este utilizată pentru minimizarea diferențelor dintre valoarea estimată și cea actuală/reală a stării de sănătate a bateriei. În [2.15] este prezentată o metodă de determinare a stării de sănătate a bateriei de tip NiMH utilizată la alimentarea calculatoarelor portabile. Metoda utilizează măsurătorile de temperatură, tensiune și curent ale bateriei pentru a estima starea de încărcare a bateriei folosind un tabel de valori. De asemenea este prezentată o posibilă implementare hardware și software. Prin modificarea tabelului de valori aceste metode se pot utiliza și pentru alte tipuri de tehnologii.

În 1981, Finger de la Curtis Instruments a patentat o metodă în care starea de încărcare a bateriei cu plumb este determinată în intervalul de timp în care nici un curent nu trece prin baterie [2.30]. După aplicarea impulsului de curent se va măsura tensiunea bateriei și luând în considerare ambele valori, ale curentului și tensiunii de la baterie se poate determina caracteristica de revenire pentru tensiunea de mers în gol a bateriei.

În [2.16] este prezentată o metodă de indicare a stării de încărcare a bateriei pe baza măsurării tensiunii de funcționare în gol a bateriei. Starea de încărcare este calculată pe baza relației predeterminate dintre starea de încărcare și tensiunea de funcționare în gol, când această tensiune este 3.9 [V], starea de încărcare a bateriei este SOC=100%, când tensiunea este 3.5 [V], SOC=0%. Definiția SOC = 100% și SOC = 0% starea de încărcare actuală a bateriei se poate determina în mod corect.

Metodele prezentate în [2.17 - 2.21] utilizează contorul de sarcină (*Coulomb counting*), integrând în timp curentul bateriei. Metoda dezvoltată de Aylor în anul 1992 se referă la bateriile cu plumb [2.17] și este o combinație între metoda anterioară care utilizează valoarea tensiunii de mers în gol și integrarea în timp a curentului, pentru o mai corectă estimare a stării de încărcare a bateriei. Măsurătorile coulombmetrice sunt utilizate pentru operațiile pe termen scurt când acumularea erorii este neglijabilă. Eroarea care este acumulată în timpul integrării curentului poate fi corectată în perioada de repaus a bateriei prin măsurarea tensiunii de mers în gol. Pentru a reduce perioada de așteptare ca tensiunea de mers în gol a bateriei să se stabilizeze s-a dezvoltat o metodă de predicție a valorii acesteia. Trebuie notat că aplicarea acestor metode s-a limitat la bateriile cu plumb. În [2.22] se arată că metoda prezentată în [2.17] asigură precizie 99% pentru încărcarea bateriei dar necesită un cost ridicat de realizare. Aplicația descrisă în [2.20] se referă la pachete de baterii realizate din celule de tip NiMH, plumb, litiu-polimer, etc, operând într-un vehicul hibrid (HEV). În plus față de integrarea curentului în timp, sistemele prezentate de Kikuoka [2.18] și de către Seyfang [2.19] de asemenea țin cont de modificarea temperaturii, eficiența încărcării bateriei, autodescărcare și îmbătrânirea bateriei. În [2.19], capacitatea maximă a bateriei este monitorizată și comparată cu capacitatea maximă inițială. Când bateria este complet descărcată sau când aceasta este complet încărcată, un set de parametri specifici cum ar fi eficiența de conversie a fiecărei baterii, sunt reînnoiți pentru a lua în considerare îmbătrânirea bateriei. În [2.21], pe lângă contorizarea sarcinii, măsurarea tensiunii bateriei și măsurarea temperaturii bateriei mai este implementat un model matematic al bateriei care simulează comportarea acesteia.

40 Metode de diagnosticare a bateriilor - 2.

Metodele prezentate în [2.23 – 2.25] utilizează de asemenea metode adaptive pentru a determina starea de încărcare a bateriei. În anul 1997, Gerard ș.a. au dezvoltat o metodă în care "variabilele de stare" ale bateriei sunt înlocuite cu ponderi ale neuronului artificial, având ca scop furnizarea unei estimări precise cu privire la timpul de funcționare rămas, deci cât timp a mai rămas până la atingerea tensiunii la care funcționarea echipamentului nu mai este posibilă (cut-off voltage) [2.23]. S-au utilizat două rețele neuronale pentru a modela implementarea sistemului cu scopul de a adapta predicția curbei de descărcare a curentului la comportarea generală a bateriei utilizate. Folosind această metodă s-a făcut o eroare medie de 3%. În anul 1999, Salkind ș.a. au dezvoltat o metodă de estimare a stării de încărcare și a stării de sănătate a bateriei bazându-se pe logica fuzzy pentru a analiza datele obținute prin spectroscopia impedanței și/sau contorizarea sarcinii din interiorul bateriilor de tip litiu-dioxid de sulf (Li-SO₂) și NiMH [2.24]. Utilizând această metoda pentru un set limitat de date, eroarea maximă obținută între datele măsurate pentru bateria de tip Li-SO₂ și datele prezise de model a fost de +- 5%. În anul 2000, Garche ș.a. au dezvoltat o metodă în care filtrele Kalman (KF) sunt utilizate pentru a estima starea de încărcare a bateriei [2.25]. Metoda se bazează pe un model matematic al bateriei, în care tensiunea bateriei este estimată pe baza valorilor măsurate de curent și temperatură. Adaptabilitatea modelului constă în compararea valorilor estimate de model cu comportarea reală a bateriei.

În 2000, Bervgeld ș.a. au dezvoltat o metodă de estimare a stării de încărcare a bateriilor reîncărcabile de tip Li-ion [2.1, 2.26]. Algoritmul are la bază măsurarea curentului în timpul încărcării sau descărcării bateriei și de asemenea măsurarea tensiunii bateriei în timpul stării de echilibru a bateriei. În cazurile când bateria se încarcă sau se descarcă, starea de încărcare a bateriei se bazează pe însumarea sarcinii retrase din baterie sau furnizate bateriei prin integrarea curentului în timp. Deci, în aceste situații se aplică contabilizarea sarcinii iar bateria este privită ca un simplu condensator liniar.

În cazul în care bateria este în timpul procesului de descărcare, pe lângă contabilizarea sarcinii se mai ia în considerare și supratensiunea. Datorită acestei supratensiuni valoarea tensiunii bateriei în timpul descărcării este mai mică decât valoarea tensiunii de mers în gol. Valoarea supratensiunii depinde de valoarea curentului de descărcare, de starea de încărcare a bateriei și de temperatură. În special la temperaturi scăzute și la valori mici ale stării de încărcare a bateriei, datorită valorii mari a supratensiunii (în principal cauzate de limitările datorate difuziei și reacțiilor electrochimice din interiorul bateriei) sarcina rămasă în baterie nu poate fi descărcată. Acest lucru duce la o aparentă pierdere a capacității de stocare a bateriei, care la temperatura de 0C poate ajunge la o valoare de peste 5%. Deci trebuie făcută o diferență între cantitatea de sarcină din interiorul bateriei și cantitatea ce poate fi descărcată din baterie în anumite condiții specifice. Deoarece valoarea supratensiunii este dependentă de temperatură, aceasta trebuie măsurată în timpul procesului de descărcare [2.1].

În timpul stării de echilibru starea de încărcare a bateriei se determină pe baza valorilor măsurate ale tensiunii bateriei. Algoritmul utilizează curba salvată a tensiunii bateriei în funcție de starea de încărcare a acesteia, exprimată în procente din capacitatea maximă. Această dependență rămâne neschimbată pe măsură ce bateria îmbătrânește, iar dependența de temperatură e de asemenea mică [2.1, 2.27]. Metoda care utilizează valorile tensiunii de mers în gol a bateriei funcționează și pentru calibrarea stării de încărcare calculate, pentru că pentru o

anumită valoare măsurată a tensiunii bateriei, valoarea stării de încărcare a acesteia este aceeași indiferent de vârsta și de temperatura bateriei. Această calibrare este foarte importantă pentru că în procesele de încărcare sau de descărcare ale bateriei, valoarea stării de încărcare calculate pe baza integrării în timp a curentului bateriei poate avea abateri serioase datorită erorilor acumulate ale măsurătorilor de curent [2.1].

În 2006 Kazuo Onda ș.a [2.31] au dezvoltat o nouă metodă de măsurare a impedanței $Z(\omega)$ pentru bateriile Li-ion și NiMH, aplicând un semnal treaptă sau impuls de curent bateriei și observând răspunsul în tensiune al acesteia. Ei au utilizat transformatele Laplace ale semnalelor de intrare treaptă de curent și a semnalului răspuns în tensiune pentru a calcula impedanța sistemului electrochimic la diferite frecvențe. Rezultatele obținute pentru semnalele de intrare de tip curent treaptă și impuls de curent au fost apropiate, iar valoarea $Z(\omega)$ nu a depins de sensul curentului încărcare/descărcare. Ei au vrut să găsească o legătură între rezistența măsurată în curent continuu pe baza curbilor de încărcare/descărcare și impedanța complexă măsurată în curent alternativ. Problema este de a găsi frecvența pentru care $Z(\omega)$ este egală cu rezistența bateriei în curent continuu.

2.3 Metode actuale de diagnosticare a bateriilor

În secțiunea precedentă au fost amintite câteva metode de diagnosticare a bateriilor. O metodă ieftină și rapidă ar fi măsurarea tensiunii bateriei, dar această metodă nu oferă indicații precise despre capacitatea bateriei, deoarece modificările de temperatură, curentul de descărcare și îmbătrânirea bateriei duc la modificarea acestui parametru. O altă metodă ar fi măsurarea impedanței bateriei utilizând punți de măsurare reglate manual. Rezultatele obținute sunt comparate cu rezultatele anterioare care servesc ca referințe. Răspunsul în tensiune al bateriei la aplicarea unui curent treaptă este folosit de asemenea pentru a stabili capacitatea bateriei de a furniza curenți de o anumită valoare. Aceste metode de diagnosticare a bateriei sunt denumite măsurători directe.

O altă metodă este de a măsura curentul descărcat din baterie și cel de încărcare a bateriei și de a integra acest curent în timp pentru a afla capacitatea existentă în baterie. Această metodă este de asemenea afectată de precizia cu care este măsurat curentul și de aceea periodic valoarea obținută pentru starea de încărcare a bateriei trebuie corectată.

Problema principală când se proiectează un sistem de diagnosticare pentru o baterie este faptul că atât bateria cât și utilizatorul se comportă într-un mod imprevizibil. De aceea este indicat să se folosească sistemele adaptive de diagnosticare, care se bazează pe măsurători directe, pe contorizarea sarcinii sau pe amândouă. În continuare vor fi prezentate fiecare din metodele amintite.

2.3.1 Metodele de măsurare directă

Măsurarea directă se referă la măsurarea parametrilor bateriei cum ar fi tensiunea bateriei, impedanța bateriei și timpul de relaxare după aplicarea unui impuls de curent. Relațiile dintre parametrii mășurați ai bateriei și starea acesteia depind de temperatură. De aceea, pe lângă tensiune sau impedanță, temperatura bateriei trebuie de asemenea măsurată.

A. Măsurarea tensiunii bateriei

Deși este o metodă larg răspândită, acest procedeu nu oferă o precizie prea mare. Determinând capacitatea rămasă în baterie doar cu ajutorul acestei măsurători poate fi foarte ușor, rapid și ieftin dar în condiții reale de funcționare a bateriei rezultatul obținut poate fi eronat. În timpul descărcării bateriei tensiunea acesteia scade, dar relația dintre valoarea tensiunii și capacitatea rămasă în baterie depinde de temperatura bateriei și de valoarea curentului de descărcare – vezi **Fig.2.1**.

Un aspect important arătat în **Fig.2.1** este relația dintre tensiunea celulei și capacitatea descărcată din baterie pentru diferiți curenți de descărcare. Eroarea în estimarea stării de încărcare pe baza măsurării tensiunii celulei poate fi corectată dacă se cunosc aceste dependențe ale tensiunii celulei de temperatură și de curenții de descărcare. Dacă aceste curbe se introduc în algoritmul de calcul, acesta devine mai complicat și mai costisitor decât cel care utilizează contorizarea sarcinii.

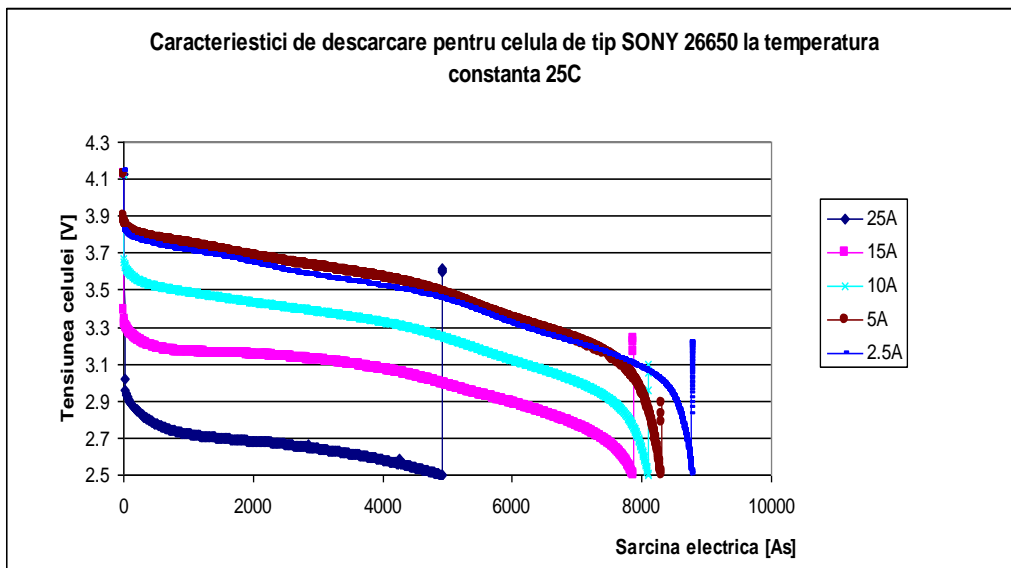


Fig.2.1 Curbele tensiunii pentru o celulă Li-ion pentru diferiți curenți de descărcare, la temperatură constantă 25°C

B. Măsurarea tensiunii la funcționarea în gol a bateriei

Pentru multe din bateriile existente valoarea tensiunii de circuit deschis (OCV = Open Circuit Voltage) este un bun indicator pentru starea de încărcare a acestora, cu condiția ca în timpul determinării bateria să fie în stare de echilibru, adică să nu existe curent de încărcare/descărcare a bateriei și tensiunea la bornele ei să nu se modifice în timp.

Când algoritmul de determinare a stării de încărcare a bateriei se bazează pe măsurarea tensiunii de mers în gol a bateriei, este necesară o metodă cu implementare cât mai precisă. În continuare se prezintă trei metode practice de implementare:

B1. *Tabel cu valori fixe*. Se utilizează un tabel cu valori fixe ale parametrilor mășurați. Mărimea tabelului și precizia determinării stării de încărcare depind de numărul de valori salvate. Un mare dezavantaj al acestei metode este faptul că nu

este posibil să se ia în considerare toate punctele de pe această caracteristică pentru a avea un sistem de determinare a stării de încărcare precis. Cu cât sunt introduse mai multe valori în acest tabel, cu atât va fi mai greoi și lent acest algoritm.

B2. *Linearizare pe porțiuni.* Caracteristica tensiunii de mers în gol este aproximată prin linearizare pe porțiuni. Un exemplu este prezentat în tabelul 2.1 unde sunt valorile pentru o celulă de tip Li-ion Sony 18650G3 [2.28]:

Tab. 2.1 Posibilă implementare a metodei liniarizării pe porțiuni [2.28]

Numărul intervalului	Limitele tensiunii [V]	Starea de încărcare [%]
1	4.08 – 4.24	85 - 100
2	4.06 – 4.08	81.7 - 85
3	4.02 – 4.06	76.7 – 81.7
4	3.98 – 4.02	73.4 – 76.7
5	3.88 – 3.98	58.4 – 73.4
6	3.8 – 3.88	22 – 58.4
7	3.68 – 3.8	8.7 - 22
8	3.54 – 3.68	5.4 – 8.7
9	3.32 – 3.54	2.1 – 5.4
10	3 – 3.32	0.5 – 2.1
11	2.5 - 3	0 – 0.5

Starea de încărcare a bateriei (SoC = State of Charge) se poate determina pentru orice valoare a tensiunii măsurate U_{mas} cu următoarea relație:

$$SoC = SoC_{inferior} + \frac{U_{mas} - U_{inferior}}{U_{superior} - U_{inferior}} (SoC_{superior} - SoC_{inferior}) \quad (2.2)$$

unde $U_{superior}$ și $U_{inferior}$ sunt limitele superioară și respectiv inferioară ale tensiunilor pentru intervalele din tabelul 2.1, iar $SoC_{superior}$ și $SoC_{inferior}$ sunt stările de încărcare corespunzătoare, din același tabel. Această metodă este mai precisă decât precedenta și oferă mai multă flexibilitate.

B3. *Funcții matematice.* În această metodă, caracteristica tensiunii de mers în gol este aproximată cu ajutorul funcțiilor matematice. În continuare se va prezenta ca exemplu tensiunea de mers în gol pentru o baterie Li-ion modelată ca o diferență dintre potențialele de echilibru ale electrozilor pozitiv și negativ [2.28]:

$$U_{emf} = E_{LiCoO_2}^{eq} - E_{LiC_6}^{eq} \quad (2.3)$$

unde potențialele de echilibru ale electrozilor pozitiv și negativ sunt modelate după cum urmează:

- electrodul pozitiv:

$$E_{LiCoO_2}^{eq} = E_{LiCoO_2}^0 - J \left(\log \left(\frac{x_{Li}}{1 - x_{Li}} \right) + U_j^+ x_{Li} - \zeta_j^+ \right) \quad (2.4)$$

$$\zeta_2^+ = (U_2^+ - U_1^+)^* x_{ph} + \zeta_1^+, \quad j = \begin{cases} 1 & x_{ph} \leq x_{Li} \leq 1 \\ 2 & 1/2 \leq x_{Li} \leq x_{ph} \end{cases} \quad (2.5)$$

44 Metode de diagnosticare a bateriilor - 2.

$E_{LiCoO_2}^0$ - potențialul redox standard al electrodului $LiCoO_2$ [V], U_j^+ - coeficient adimensional de interacțiune energetică în electrodul $LiCoO_2$, ζ_j^+ - constantă adimensională, x_{Li} - fracțiune molară a ionilor de Li^+ în interiorul electrodului pozitiv, deci starea de încărcare a electrodului $LiCoO_2$, $J = \frac{RT}{F}$, R - constanta gazelor (8,314 [J/(mol*K)]), F - constanta lui Faraday (96485 [C/mol]) și T este temperatura mediului [K].

Electrodul negativ este modelat asemănător:

$$E_{LiC_6}^{eq} = E_{LiC_6}^0 - J \left(\log \left(\frac{z_{Li}}{1 - z_{Li}} \right) + U_j^- z_{Li} - \zeta_j^- \right) \quad (2.6)$$

$$\zeta_j^- = \left(U_2^- - U_1^- \right)^* z_{ph} + \zeta_1^-, \quad j = \begin{cases} 1 & 0 \leq z_{Li} \leq z_{ph} \\ 2 & z_{ph} \leq z_{Li} \leq 1 \end{cases} \quad (2.7)$$

$E_{LiC_6}^0$ - potențialul redox standard al electrodului LiC_6 [V], U_j^- - coeficient adimensional de interacțiune energetică în electrodul LiC_6 , ζ_j^- - constantă adimensională, z_{Li} - fracțiune molară a ionilor de Li^+ în interiorul electrodului negativ, deci starea de încărcare a electrodului negativ. În condiții de funcționare normale x_{Li} are valori între 0.5 și 1 și z_{Li} între 0 și 1.

C. Măsurarea impedanței bateriei

O metodă utilă în studierea proceselor care au loc în sistemele electrochimice, inclusiv procese biologice, procesele din baterii și condensatoare, este de a măsura impedanța pentru o plajă largă de valori ale frecvenței, iar această metodă se numește spectroscopia de impedanță electrochimică (EIS = Electrochemical Impedance Spectroscopy).

Impedanța electrochimică a bateriei caracterizează comportarea dinamică a acesteia, adică răspunsul bateriei la un semnal de excitație de mică amplitudine. În principiu se poate utiliza orice tip de formă de undă pentru semnal (sinusoidal, zgomot, treaptă, etc.). În practică se utilizează cel mai des forma de undă sinusoidală. În modul galvanostatic (curent constant) curentul constant I de încărcare sau descărcare este modificat folosind un curent sinusoidal [2.28]:

$$\Delta I = I_{max} \sin(2\pi f t) \quad (2.8)$$

cu frecvența f, care este suprapus peste curentul I, producând un răspuns în tensiune:

$$\Delta V = V_{max} \sin(2\pi f t + \varphi) \quad (2.9)$$

în jurul tensiunii V de la bornele bateriei. Amplitudinea V_{max} și unghiul de fază φ depind de frecvența f a semnalului aplicat. În modul potențiosstatic (tensiune constantă), tensiunea constantă de la bornele bateriei este modificată folosind un semnal sinusoidal:

$$\Delta V = V_{max} \sin(2\pi f t) \quad (2.10)$$

cu frecvența f, care este suprapus peste V, generând un răspuns sinusoidal în curent de forma:

$$\Delta I = I_{max} \sin(2\pi ft - \varphi) \quad (2.11)$$

în jurul curentului I . În ambele cazuri impedanța este definită ca:

$$Z(f) = \frac{V_{max}}{I_{max}} e^{j} \quad (2.12)$$

Deci, impedanța electrochimică a unei baterii este un număr complex caracterizat de părțile reală și imaginară sau prin modul și unghiul de fază.

Dacă măsurătorile se fac pentru un interval mare de frecvențe, diversele procese fizice care au loc în interiorul sistemului electrochimic pot fi separate cu ajutorul constantelor lor de timp. Este important ca amplitudinea semnalului perturbator să fie suficient de mică pentru ca sistemul electrochimic să se comporte liniar. Ca o regulă generală, amplitudinea vârf la vârf a tensiunii perturbatoare nu trebuie să depășească 10[mV]. În timpul experimentului celula este adusă și menținută 1 oră în starea de încărcare dorită. Apoi, se aplică celulei o tensiune sinusoidală perturbatoare de o anumită frecvență. Răspunsul în curent rezultat este înregistrat și acesta furnizează informații despre starea electrochimică a sistemului, coresunzătoare frecvenței și temperaturii respective. Procesul este repetat la diferite frecvențe, intervalul tipic fiind între 10kHz și 1mHz pentru o anumită stare de încărcare a celulei (vezi **Fig. 2.2 și 2.3**). Modificările care apar în semnalele de răspuns ale sistemului furnizează date importante despre mecanismele interne ale celulei. De exemplu, diagrama Nyquist translatață la dreapta și care își păstrează forma, indică o creștere a rezistenței electrice serie a celulei. Rezistența electrică serie a celulei este rezistența din punctul în care graficul impedanței intersectează axa reală. Această valoare este atribuită în general frecvențelor înalte ale semnalului perturbator. Pentru frecvențe mai joase, spectrele impedanțelor au forma a două semicercuri, unul mai mic și ușor aplatizat, în timp ce al doilea este mai mare și crește accentuat pe măsură ce starea de încărcare a celulei este mai mică. Ca exemplu, în **Fig.2.2** [2.28] este prezentat spectrul impedanței (diagrama Nyquist) pentru o baterie cu plumb:

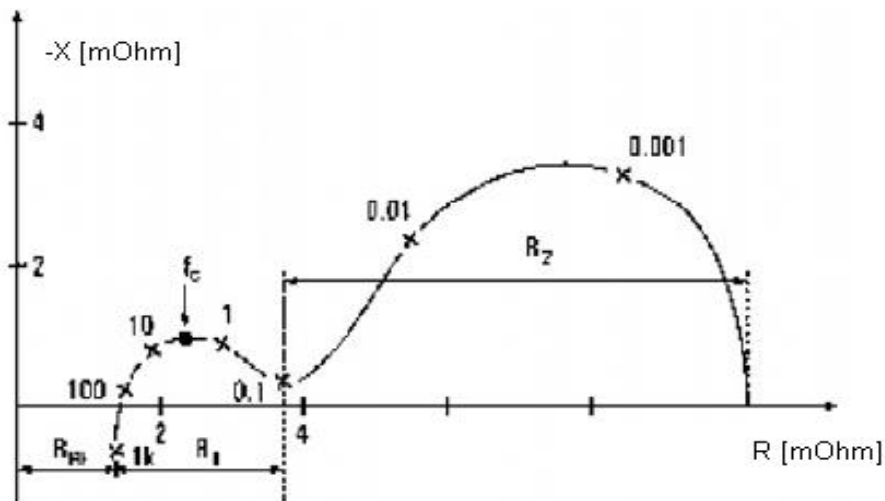


Fig.2.2 Diagrama Nyquist pentru o baterie cu plumb (frecvențele sunt în Hz) [2.28]

46 Metode de diagnosticare a bateriilor - 2.

Diagrama Nyquist din **Fig. 2.2** prezintă următoarele:

- o parte inductivă la frecvențe mai mari de 100Hz;
- o rezistență electrică la frecvențe înalte R_{HF} de ordinul $m\Omega$, care reprezintă partea reală a impedanței la frecvențe mai mari de 100Hz;
- un prim semicerc mic (diametru R1) pentru frecvențe între 0.1 și 100 Hz, corespunzând reacțiilor electrochimice de cinetică mare;
- un al doilea semicerc mai mare (diametru R2) pentru frecvențe mai mici de 0.1Hz, corespunzând reacțiilor electrochimice care se desfășoară cu viteză mică.

În **Fig. 2.3** sunt prezentate spectrele impedanțelor corespunzătoare unei celule SONY 26650 pentru stări de încărcare ale celulei de 20%, 50%, 70%, 90% și 100%. Măsurătorile s-au efectuat într-un laborator specializat și s-au făcut la temperatura de 25 °C.

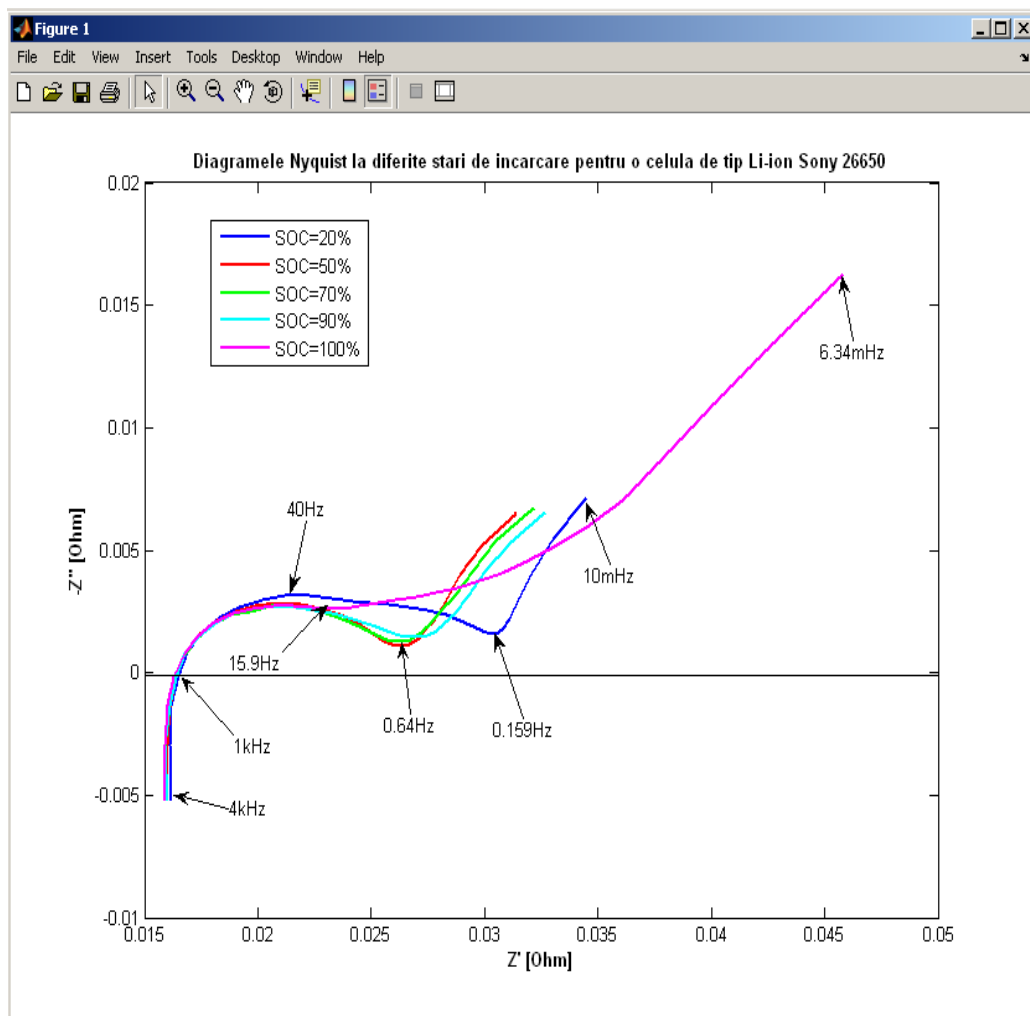


Fig.2.3 Spectrul impedanțelor pentru o celulă de tip SONY 26650 pentru temperatura de 25° C la diferite stări de încărcare

Pentru a modela comportarea celulei conform spectrului impedanței obținut din măsurători (**Fig. 2.3**) și având în vedere procesele fizice de bază din interiorul celulei, se poate defini un circuit electric echivalent acesteia și se pot calcula parametrii acestuia [2.1]. În **Fig. 2.4** este prezentat circuitul electric echivalent pentru celula de tip Li-ion SONY 26650. Acest circuit constă dintr-o inductivitate L, o rezistență R1 și două circuite RC înseriate. Acest circuit reușește să modeleze toate procesele relevante care au loc în interiorul celulei incluzând porozitatea, transferul de sarcină și procesul de difuzie, cu suficientă precizie cu toate simplificările care au trebuit făcute.

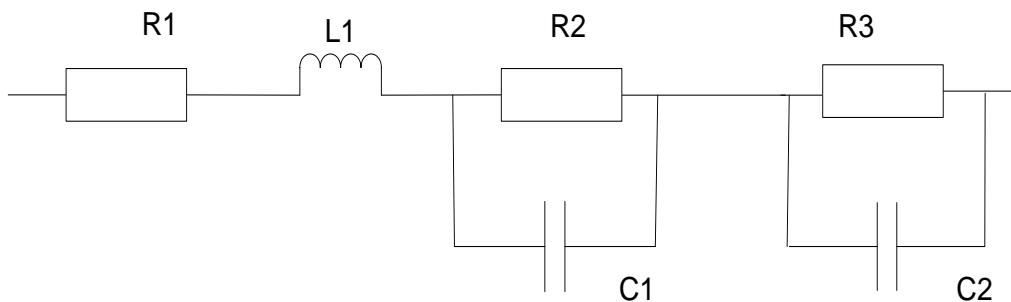


Fig. 2.4 Circuitul electric echivalent pentru o celula de tip Li-ion SONY 26650

Circuitul electric echivalent prezentat în **Fig. 2.4** este o variantă de circuit care satisface rezultatele obținute în urma măsurării impedanței celulei de tip Li-ion. Comportarea celulei poate fi modelată și prin adăugarea altor elemente de circuit, mai sofisticate, cum ar fi de exemplu elementul constantă de fază (constant phase element - CPE). Elementul constantă de fază este utilizat pentru a modela semicercul micșorat (deformat) în regiunile de frecvență înaltă și medie care apare la diagramele impedanțelor bateriilor. CPE-urile au fost asociate cu neomogenitatea proprietăților fizice și chimice ale electrozilor și interpretate prin fenomenele asociate cu structurile poroase ale electrodului, cu neregularitatea suprafețelor electrozilor, cu vitezele de reacție diferite pe suprafețele policristaline de metal sau de carbon ale electrozilor și cu grosimea variabilă a stratului de acoperire la fiecare electrod. Ideea comună pentru toate aceste explicații este aceea că unele proprietăți ale sistemului nu sunt omogene sau că există unele distribuții (dispersii) ale valorilor unor proprietăți fizice ale sistemului. Din punct de vedere matematic impedanța unui element constantă de fază se exprimă astfel [2.9]:

$$\frac{1}{Z} = \underline{Y} = Q^0(j\omega)^n \quad (2.13)$$

Unde Q^0 este valoarea numerică a admitanței pentru $\omega=1$ [rad/s]. O consecință a acestei ecuații simple ar fi că unghiul de fază al impedanței acestui element este independent de frecvență și are o valoare de $(n/2)*n$ grade, cu valori ale lui $0 < n \leq 1$. Pentru $n=1$ unghiul de fază al acestei "capacități" este 90° . În realitate unghiul de fază este mai mic de 90° .

Măsurarea impedanței bateriei funcție de frecvență nu este o metodă practică de diagnosticare care se poate folosi în produsele portabile. Această metodă se folosește în laborator, pentru a determina diferite caracteristici ale bateriei.

2.3.2 Sisteme de contabilizare a sarcinii

Contabilizarea sarcinii electrice este o metodă pentru determinarea stării de încărcare a bateriei care se bazează pe măsurarea și integrarea în timp a curentului bateriei. Datele despre contorizarea sarcinii bateriei precum și alte date cum ar fi rata de autodescărcare a bateriei, temperatura bateriei, eficiența de încărcare/descărcare, istoricul bateriei (cicluri de încărcare/descărcare), etc., sunt utilizate ca date de intrare pentru sistemul de contabilizare a sarcinii din interiorul bateriei. Următoarele procese din bateriile de tip Li-ion pot fi compensate pentru un sistem de contabilizare a sarcinii:

A. Eficiența descărcării

În funcție de starea de încărcare a bateriei, de temperatură și de curentul de descărcare, doar o parte din sarcina electrică existentă în interiorul bateriei poate fi folosită în exteriorul ei. Principalele mecanisme din spatele acestei eficiențe a descărcării sunt cinetica reacțiilor și procesele de difuzie. Aceste mecanisme implică viteza de reacție și constantele de difuzie ale proceselor, care sunt dependente de temperatura bateriei. Mai mult, datorită curenților mari de descărcare, se accentuează scăderea concentrațiilor speciilor active de la suprafața electrozilor, iar constantele de reacție se modifică în timp datorită îmbătrânirii bateriei. Ca urmare, bateria care poate părea descărcată după ce a fost descărcată cu un curent relativ mare se poate descărca în continuare cu un curent de descărcare mai mic și/sau după o perioadă de repaus. În general, la temperaturi mici ale mediului ambiant și/sau la curenți de descărcare mari din baterie se poate folosi mai puțină sarcină. Vârsta bateriei influențează de asemenea eficiența descărcării datorită creșterii rezistenței electrice interne.

B. Autodescărcarea

Orice baterie treptat pierde sarcină electrică, fenomen care este sesizat atunci când bateria este nefolosită o perioadă mai lungă de timp. Acest fenomen nu poate fi măsurat de un contor de sarcină pentru că nici un curent nu trece pe la bornele bateriei. Viteza de autodescărcare depinde de starea de încărcare a bateriei și de temperatură.

Autodescărcarea bateriei are o componentă reversibilă și una ireversibilă, ambele cu atât mai mari cu cât temperatura de stocare este mai ridicată și de asemenea cu cât starea de încărcare a bateriei este mai mare [2.32].

C. Scăderea capacității bateriei

Capacitatea maximă a unei baterii scade în timp, odată cu îmbătrânirea acesteia. Această scădere depinde de mai mulți factori. În general, cu cât aceasta este mai des supraîncărcată sau descărcată excesiv, cu atât pierderea va fi mai mare.

În general precizia unui sistem de contorizare a sarcinii depinde de precizia cu care se măsoară curentul pe tot domeniul de măsurare, atât în timpul încărcării cât și în timpul descărcării bateriei. Uzual, curentul bateriei se determină măsurând tensiunea pe un rezistor șunt conectat în serie cu bateria. Curentul determinat în acest mod este integrat în timp pentru a determina starea de încărcare a bateriei. Din acest motiv, chiar și o eroare mică în determinarea curentului poate duce la erori mari în determinarea stării de încărcare.

2.3.3 Sisteme adaptive de diagnosticare

Sistemele adaptive se bazează pe măsurările directe, pe sistemele de contorizare a sarcinii sau folosesc o combinație a celor două metode. Câteva sisteme de diagnosticare adaptive existente vor fi prezentate în continuare.

Utilizarea filtrelor Kalman are la bază un model numeric pentru baterie. Tensiunea bateriei este estimată pe baza valorilor măsurate ale curentului și temperaturii și apoi rezultatul este comparat cu valoarea măsurată a tensiunii – vezi **Fig.2.5**. Parametrii interni sunt starea de încărcare a bateriei (SoC), dar pot fi și alte variabile ale bateriei: de exemplu valoarea rezistenței interne serie (care va oferi informații despre starea de sănătate a bateriei). De asemenea modelul mai poate conține funcții de măsurare directă sau de contabilizare a sarcinii, sau o combinație a celor două. Calculul începe cu un set de parametri de bază, parametrii care descriu comportarea standard a bateriei în cauză. Adaptivitatea modelului constă în compararea valorilor estimate cu cele măsurate pentru parametrii puși sub observație. Scopul filtrului Kalman este de a estima pe baza măsurătorilor starea sistemului. Filtrul are avantajul de a fi secvențial - are nevoie doar de variabilele sistemului de la pasul anterior și valoarea curentului. Filtrul Kalman extins poate fi utilizat pentru a identifica și adapta parametrii necunoscuți din modelul bateriei în timp real, pe baza valorii tensiunii, curentului și temperaturii bateriei. Modelele mai complicate țin seama de termeni care arată contribuțiile dinamice ale tensiunii de mers în gol, constantelor de timp de polarizare, histeresei electrochimice, pierderilor ohmice și influențelor temperaturii.

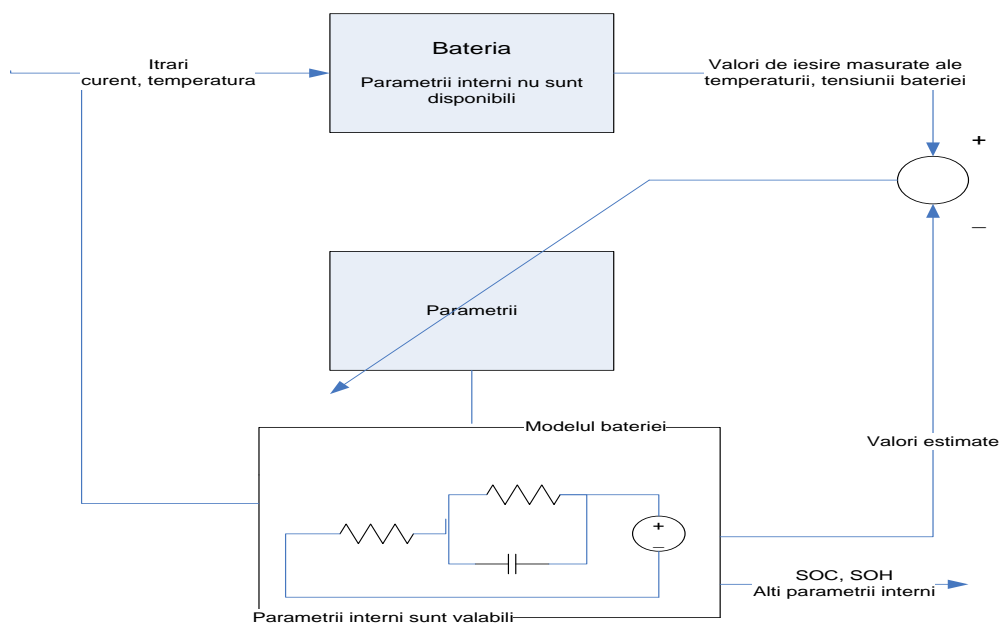


Fig. 2.5 Filtru Kalman pentru determinarea stării de încărcare și de sănătate a bateriei [2.28]

O altă variantă existentă este aceea de a înlocui variabilele de stare ale bateriei cu ponderi ale neuronului artificial (neural weights). În **Fig.2.6** sunt prezentate două rețele neuronale artificiale (ANN – artificial neural networks) care

sunt utilizate pentru a modela un sistem care adaptează predicția curbei curentului de descărcare la comportarea generală a bateriei utilizate [2.28].

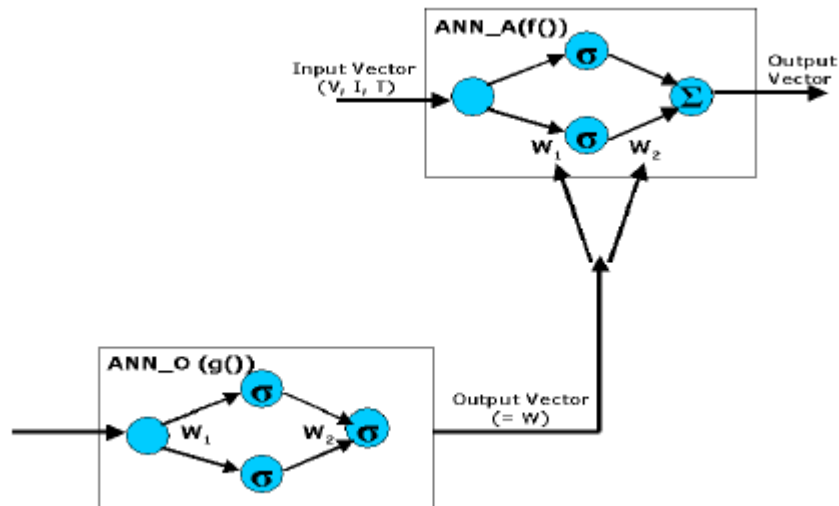


Fig. 2.6 Reprezentarea schematică unui sistem inteligent de diagnosticare a bateriei care folosește rețele neuronale [2.28]

O rețea neuronală artificială necesită cel puțin două faze: faza de antrenare, în care se setează ponderile la valorile care oferă cel mai bun "compromis" și o fază de evaluare pentru a testa precizia rezultatelor obținute. În [2.23] s-au folosit 2860 de curbe de descărcare (260 de cicluri de descărcare pentru 11 baterii) pentru antrenarea sistemului. Eroarea medie obținută utilizând această metodă a fost de aproximativ 3%.

În [2.29] este prezentată o metodă de determinare a stării de încărcare a bateriei indicată pentru aplicații de comunicații mobile. Sunt investigate efectele impulsurilor de curent folosind o rețea neuronală cu trei straturi de neuroni care a fost antrenată folosind metoda back propagation pentru a găsi ponderile și deplasamentul pentru toți neuronii, metoda bazându-se pe eroarea dintre starea de încărcare și ieșirile rețelei.

În [2.24], bazându-se pe modelarea cu logică fuzzy, s-au calculat stările de încărcare și de sănătate pentru două tipuri de baterii: litiu – dioxid de sulf și NiMH. Metoda utilizează logica fuzzy pentru a analiza datele obținute prin metoda spectroscopiei de impedanță electrochimică și prin metoda contorizării sarcinii. Informația primară poate fi exprimată sub forma unor mărimi ferme – de ex. o temperatură între 30^o C și 40^o C sau cu ajutorul unor caracterizări vagi cum ar fi temperatura e "caldă". Termenul lingvistic (TL) "cald" face parte din mulțimea TL care descriu valoarea lingvistică (VL) corespunzătoare temperaturii. Gradul de activare al unui TL este indicat printr-o valoare numită grad de apartenență.

În tabelul de mai jos sunt rezumate câteva din metodele de diagnosticare a bateriilor, domeniile de aplicabilitate, avantajele și dezavantajele lor:

Tab. 2.2 Metode de diagnosticare a bateriilor[2.28]

Metoda	Domeniul de aplicabilitate	Avantaje	Dezavantaje
Test de descărcare	Determinarea capacității bateriei;	Ușor și precis; Independent de SoH;	Necesită timp îndelungat; Modifică starea bateriei; Pierdere de energie;
Contorizarea sarcinii electrice	Toate tipurile de baterii	Este precisă dacă sunt prevăzute suficiente puncte de recalibrare ;	Sensibilă la reacții parazite; Necesită puncte de recalibrare;
Tensiunea de mers în gol a bateriei	Baterii cu plumb, litiu, Zn/Br	Ieftină, determinare rapidă;	Necesită timp de relaxare mare;
Spectroscopia de impedanță electrochimică	Toate bateriile	Informații despre starea de sănătate a bateriei;	Foarte costisitoare; Sensibilă la modificarea temperaturii
Rezistența internă	Baterii cu Pb, Ni/Cd, Li-ion;	Informații despre starea de sănătate a bateriei; posibilitate de măsurare rapidă;	Precizie bună pentru scurt interval de timp;
Rețele neuronale artificiale	Toate bateriile	Rapidă;	Necesare date pentru antrenarea rețelei de la o baterie similară; Costisitor de implementat;
Logica fuzzy	Toate bateriile	Rapidă;	Necesită spațiu de memorie în aplicațiile reale;
Filtre Kalman	Toate bateriile	Rapidă;	Dificil de a implementa algoritmul de filtrare care ia în considerare toate caracteristicile;

2.4 Concluzii

În acest capitol se prezintă succint evoluția metodelor de diagnosticare a bateriilor de-a lungul timpului. Este realizată o sinteză a acestor metode de diagnosticare, mai apoi se prezintă detaliat câteva din cele mai răspândite categorii de metode de diagnosticare: măsurarea directă, contabilizarea sarcinii electrice și sistemele adaptive de diagnosticare. Se face o analiză comparativă a acestor tipuri de metode de diagnosticare subliniindu-se avantajele și dezavantajele fiecăreia.

2.5 Bibliografie

- [2.1] Bergveld H J, Kruijt W S and Notten P H L, *Battery Management Systems, Design by Modelling (Philips Research Book Series)* vol 1 (Boston, MA: Kluwer), 2002;
- [2.2] Dreer H Curtis wheelchair battery fuel gauge *Product Test Report* Marketing Services Dept., Curtis Instruments, Inc, 1984;
- [2.3] Lerner S, Lennon H and Seiger H N, Development of an alkaline battery state of charge indicator *Power Sources* 3 135–7, 1970;
- [2.4] York R A, Self-testing battery discharge indicator *US Patent* 3,932,797 filed 24 December, 1974;
- [2.5] Hing S Device for estimating the state of charge of a battery *US Patent* 6,529,840 filed 12 October, 2000;
- [2.6] Goedken T J and Goedken J F, Method and apparatus for detecting the state of charge of a battery *US Patent* 5,185,566 filed 18 November, 1991;
- [2.7] Brandwein R and Gupta M L, Nickel-cadmium battery monitor *US Patent* 3,940,679 filed 18 June, 1974;
- [2.8] Laig-Horstebroek H, Meissner E and Richter G, Method for determining the state of charge and loading capacity of an electrical storage battery *US Patent* 6,362,598 filed 26 April, 2001;
- [2.9] Rodrigues S, Munichandraiah N and Shukla A K A review of state-of-charge indication of batteries by means of a.c. impedance measurements *J. Power Sources* 87 12–20, 1999;
- [2.10] Dowgiallo E J Jr, Method for determining battery state of charge by measuring A.C. electrical phase angle change *US Patent* 3,984,762 filed 7 March, 1975;
- [2.11] Zaugg E, Process and apparatus for determining the state of charge of a battery *US Patent* 4,433,295 filed 8 January, 1982;
- [2.12] Muramatsu K, Battery condition monitor and monitoring method *US Patent* 4,678,998 filed 9 December
- [2.13] Peled E, Yamin H, Reshef I, Kelrich D and Rozen S, Method and apparatus for determining the state-of-charge of batteries particularly lithium batteries *US Patent* 4,725,784 filed 10 September, 1984;
- [2.14] Kopmann U, Method of and apparatus for monitoring the state of charge of a rechargeable battery *US Patent* 4,677,363 filed 30 June, 1987;
- [2.15] Bowen L, Zarr R and Denton S, A microcontroller-based intelligent battery system *IEEE AES System Magazine* May 16–9, 1994;

- [2.16] Tanjo Y, Nakagawa T, Horie H, Abe T, Iwai K and Kawai M, State of charge indicator *US Patent* 6,127,806 filed 14 May, 1999;
- [2.17] Aylor J H, Thieme A and Johnson B W, A battery state-of-charge indicator for electric wheelchairs *IEEE Trans. Indust. Electron.* 39 398–409, 1992;
- [2.18] Kikuoka T, Yamamoto H, Sasaki N, Wakui K, Murakami K, Ohnishi K, Kawamura G, Noguchi H and Ukigaya F, System for measuring state of charge of storage battery
US Patent 4,377,787 Filed 8 August, 1980;
- [2.19] Seyfang G R, Battery state of charge indicator *US Patent* 4,949,046 filed 21 June, 1988;
- [2.20] Verbrugge M W, Tate E D Jr, Sarbacker S D and Koch B J, Quasi-adaptive method for determining a battery's state of charge *US Patent* 6,359,419 filed 27 December, 2000;
- [2.21] Richter G and Meissner E, Method for determining the state of charge of storage batteries *US Patent* 6,388,450 filed 15 December, 2000;
- [2.22] Stolitzka D and Dawson W S, When is it intelligent to use a smart battery? *No 94 TH0617-1 IEEE*, 1994;
- [2.23] Gerard O, Patillon J N and d'Alche-Buc F, Neural network adaptive modelling of battery discharge behaviour *Lect. Notes Comput. Sci.* 1327 1095–100, 1997;
- [2.24] Salkind A J, Fennie C, Singh P, Atwater T and Reisner D E, Determination of state-of-charge and state-of-health of batteries by fuzzy logic methodology *J. Power Sources* 80 293–300, 1999;
- [2.25] Garche J and Jossen A, Battery management systems (BMS) for increasing battery life time *Telecommunications Energy Special 2000 TELESCON* vol 3 pp 81–4, 2000;
- [2.26] Bergveld H J, Feil H and Van Beek J R G C M, Method of predicting the state of charge as well as the use time left of a rechargeable battery *US Patent* 6,515,453 filed 30 November, 2000;
- [2.27] Schoofs F A C M, Kruijt W S, Einerhand R E F, Hanneman S A C and Bergveld H J, Method of and device for determining the charge condition of a battery *US Patent* 6,420,851 filed 29 March, 2000;
- [2.28] Pop V, Bergveld H V, Notten P H L, Regtien P P L, State-of-the-art of battery state-of-charge determination, *Institute of Physics Publishing*, 2005;
- [2.29] Grewal S and Grant D A, A novel technique for modelling the state of charge of lithium ion batteries using artificial neural networks *Proc. Int. Telecommunications Energy Conf. (IEEE)* no 484 14–8, 2001;
- [2.30] Finger E P, Quiescent voltage sampling battery state of charge meter *US Patent* 4,460,870 filed 23 July, 1981;
- [2.31] Kazuo Onda, Masato Nakayama, Kenichi Fukuda, Kenji Wakahara, Takuto Araki, Cell Impedance Measurement by Laplace Transformation of Charge or Discharge Current-Voltage, *Journal of the Electrochemical Society*, 153 A1012-A1018, 2006;
- [2.32] D.Linden, T.B.Reddy, *Handbook of Batteries*, third edition, McGraw-Hill, 2002;

3. Metode de diagnosticare pentru bateriile de tip Li-ion utilizate în aplicații din industria auto

3.1 Elemente privind alegerea tipului de baterie

Sistemul de frânare complet electric utilizat în autovehicule nu are nici un element hidraulic de rezervă și practic nu există conexiune mecanică între acesta și piciorul șoferului. Acest sistem se bazează pe principiul penei și utilizează energia cinetică a autovehiculului pentru frânarea acestuia. Principala cerință a acestui sistem complet nou de frânare este permanenta alimentare a acestuia cu energie electrică. Sistemul electric dintr-un autovehicul care are un astfel de sistem de frânare trebuie să demonstreze o redundanță eficientă cu posibilități de diagnosticare a elementelor componente. O singură sursă de energie nu oferă nici o garanție împotriva defectării sistemului. Ca sisteme de rezervă pentru alimentarea cu energie electrică pentru un astfel de sistem de frânare au fost alese elementele electrochimice suplimentare de stocare a energiei electrice [3.3].

Sistemul de frânare electric fiind un sistem de frânare complet nou, nu există cerințe legale specifice care pot fi utilizate în evaluarea acestuia. În prezent singurele reglementări care pot fi luate în considerare pentru sistemele de frânare electrice sunt cele prevăzute în ECE-R13H care specifică cerințele generale pentru sistemele de frânare existente [3.2]. Acest set de reguli nu precizează tipul de energie care trebuie utilizat pentru frânarea autovehiculelor, deci se poate trage concluzia că energia electrică se poate utiliza la alimentarea unui sistem de frânare.

3.1.1 Principii de proiectare ale sistemelor de rezervă pentru stocarea energiei electrice pentru alimentarea sistemului de frânare electric al autovehiculelor

Din reglementările existente în ECE-R13H se pot adapta câteva cerințe pentru dimensionarea sistemului de rezervă pentru stocarea energiei electrice folosite pentru un sistem de frânare complet electric:

ECE-R13H 5.2.2.8: "Dacă forța de frânare și transmisia acesteia, ambele controlate de șofer, depind de o rezervă de energie, atunci trebuie să existe cel puțin două surse de energie independente, fiecare cu propriul său circuit de transmitere a energiei. Fiecare din acestea trebuie să acționeze frânele de la două sau mai multe roți asigurând un grad de frânare corespunzător unei frânări secundare fără a periclita stabilitatea autovehiculului. În plus, fiecare rezervă de energie trebuie să dispună de un dispozitiv de avertizare ca cel precizat în paragraful 5.2.14".

Concluziile care pot folosi la proiectarea sistemelor de stocare a energiei electrice:

- două circuite de frânare independente având transmisii independente;
- fiecare circuit de frânare are propriul sistem de stocare independent (acumulatoare de energie independente);

- fiecare rezervor de energie acționează asupra frânelor de la două sau mai multe roți;
- o singură sursă de energie, în acest caz generatorul, este suficientă pentru a alimenta cu energie sistemul complet de frânare și pentru a încărca rezervoarele de energie.

ECE-R13H 5.2.14.1: "Orice vehicul prevăzut cu un sistem de frânare acționat de la un rezervor de energie (la care performanța necesară frânării secundare nu poate fi obținută fără utilizarea energiei stocate) trebuie prevăzut cu un dispozitiv de avertizare. Trebuie să fie posibilă aplicarea frânei a 5-a oară după 4 acționări complete ale frânei și să se obțină cel puțin performanța cerută de frânarea secundară. Dispozitivul de avertizare trebuie conectat direct și permanent la circuit. Când motorul mașinii funcționează în condiții normale și nu sunt defecte în sistemul de frânare, dispozitivul de avertizare nu trebuie să dea vreun semnal de avertizare, cu excepția intervalului de timp necesar încărcării rezervoarelor de energie după pornirea motorului."

ECE_R13H 5.2.4.2: "Mai mult, dispozitivele de stocare situate pe circuitele de frânare trebuie, în cazul în care alimentarea de la circuitul principal eșuează, după patru acționări complete ale frânei să controleze oprirea vehiculului la a cincea aplicare a frânei cu performanța corespunzătoare frânării secundare în condițiile prevăzute de Reglementare în paragraful 1.2 anexa 4".

Concluzii folosite la proiectare:

- nivelul de energie din fiecare dispozitiv de stocare a energiei trebuie monitorizat;
- ținând seama de Reglementarea 5.2.4.2 [3.2] dispozitivele de stocare trebuie astfel proiectate încât să conțină suficientă energie pentru cel puțin patru acționări complete cu efectul frânării autovehiculului cu performanța unei frânări normale și o acționare având efectul unei frânări secundare, și în plus, această energie să poată fi folosită la parametrii necesari aplicației.
- dacă, indiferent de dimensiunea actuală a dispozitivelor de stocare, cantitatea de energie stocată în acestea scade sub nivelul precizat la punctul anterior sau această energie nu poate fi utilizată în exterior la parametrii ceruți de aplicație, șoferul trebuie avertizat optic sau acustic.

Următoarea prevedere crește cererea de energie necesară în acumulatorii sistemului de frânare:

ECE-R13H 5.2.20.4: "În cazul defectării sursei principale de energie, pornind de la nivelul nominal de energie, în sistemul de frânare trebuie să existe suficientă energie pentru ca întregul control al frânării să fie garantat după 20 de acționări complete ale sistemului de frânare, fiecare cu performanța realizată de o frânare normală. Acționarea frânei trebuie aplicată 20 de secunde, urmate de 5 secunde de pauză, pentru fiecare acționare".

Concluzii folosite în proiectare:

- dimensionarea dispozitivelor de stocare a energiei trebuie să asigure – presupunând că acestea sunt complet încărcate și fără o reîncărcare cu energie în timpul acestor acționări – 20 de acționări complete după cum sunt descrise în procedură– vezi **Fig. 3.1**.

Tab. 3.1 Decelerații de frânare cerute de reglementări legale

Tipul de frânare	Decelerarea de frânare prevăzută legal (Reglementarea ECE-R13H)
Frânare normală	6,43 m/s ²
Frânare secundară	2,44m/s ²

Pentru a asigura o decelerație de 6,43 [m/s²] pe toată durata de viață a autovehiculului, dimensionarea sistemului de stocare a energiei se realizează pentru o decelerare de 9,81[m/s²], ceea ce crează o marjă de siguranță suplimentară.

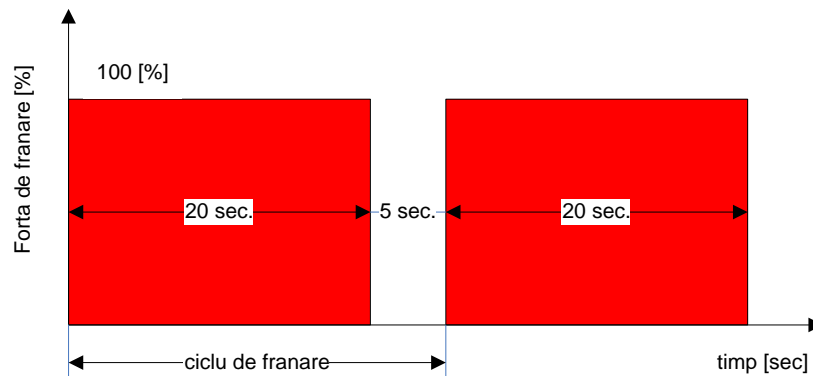


Fig. 3.1 Ciclu de frânare utilizat pentru stabilirea necesarului de energie, conform ECE-R13H

3.1.2 Dimensionarea sistemului de rezervă pentru stocarea energiei electrice

Pentru a determina consumul total de energie al sistemului de frânare electric s-au contabilizat toți consumatorii care contribuie la funcționarea acestui sistem de frânare. În **Fig. 3.2** este prezentată o secțiune printr-un mecanism de frânare electrică existent pe o roată a unui autovehicul.

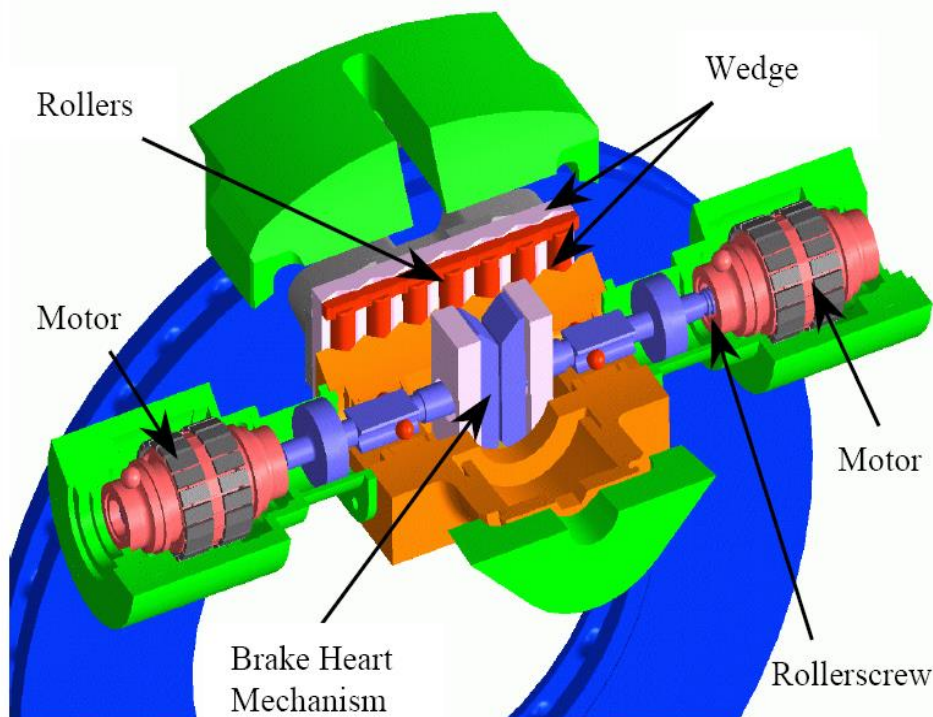


Fig. 3.2 Secțiune prin mecanismul de frânare corespunzător unei roți [3.3]

Mecanismul care acționează profilul sub formă de pană, care practic realizează frânarea, este realizat din două motoare electrice de curent continuu fără perii (BLDC), cu inerție mică, pentru acționarea rapidă a frânei. Alimentarea acestor motoare se face, în cazul funcționării normale a autovehiculului, de la bateria mașinii, cea cu plumb, dar în cazul în care acest lucru nu este posibil datorită unor defecte ale circuitelor de transmisie sau pentru că aceasta nu este încărcată suficient, alimentarea se va face de la sistemele de rezervă de stocare a energiei electrice. Deci acestea trebuie astfel dimensionate încât să poată furniza necesarul de energie în condițiile specificate de normele legale în vigoare care au fost specificate anterior. Suplimentar, acestea mai trebuie să alimenteze și circuitele electronice care sunt prevăzute pentru comanda și controlul acestor motoare și a altor dispozitive auxiliare existente. Tensiunea minimă necesară pentru buna funcționare a ansamblurilor motoare+electronica aferentă este 10[V] [3.7].

Ținând seama de particularitățile sistemului de acționare a frânei, se poate corela ciclul de frânare definit de reglementările mai sus menționate cu necesarul de curent de la sistemele de rezervă pentru stocarea energiei electrice după cum urmează:

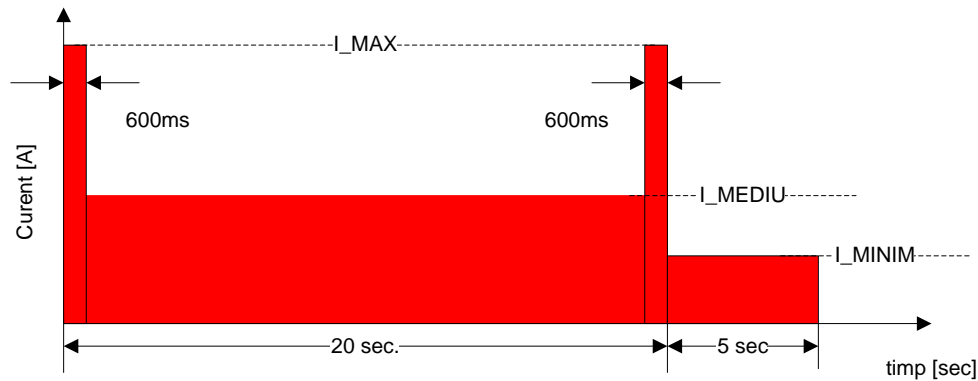


Fig. 3.3 Ciclu de frânare din punct de vedere al consumului de curent din sistemul de stocare a energiei electrice [3.7]

În **Fig. 3.3** este prezentat necesarul de curent pentru un ciclu de frânare pentru un circuit de frânare. Un circuit de frânare este realizat din ansamblurile de frânare care echează două roți ale autovehiculului. Pentru asigurarea stabilității autovehiculului acestea s-au cuplat astfel: roata dreapta față cu roata stânga spate și roata stânga față cu cea dreapta spate. Deci un autovehicul va avea două circuite de frânare, fiecare având un sistem de rezervă pentru stocarea energiei.

Vârful de curent de la începutul ciclului de frânare este necesar pentru accelerarea motoarelor pentru aducerea mecanismului de frânare în poziția necesară realizării cuplului de frânare corespunzător unei decelerații a autovehiculului de $9,81[m/s^2]$. Curentul mediu care urmează este necesar pentru menținerea mecanismului în poziția cerută pentru realizarea cuplului de frânare iar vârful de curent final este necesar pentru accelerarea motoarelor și aducerea rapidă a mecanismului în poziția în care cuplul de frânare este 0. În final, curentul minim este necesar elementelor auxiliare în intervalul de timp când nu avem cuplu de frânare [3.3].

Temperatura mediului ambiant este un parametru decisiv pentru capacitatea bateriei atât la încărcare cât și la descărcare. De asemenea, are o influență decisivă în procesul de îmbătrânire al bateriei. Temperatura ideală de operare este în jurul valorii de $20^{\circ}C$ pentru cele mai multe acumulate. În condiții normale, temperaturile scăzute pot duce la scăderea performanțelor, în timp ce acelea ridicate duc la accelerarea procesului de îmbătrânire a acumulatorului [3.8].

Reglementările cuprinse în ECE-R13H nu precizează valori ale temperaturii pentru care să se facă dimensionarea acumulatorilor de energie electrică. În aceste condiții s-a considerat pentru acumulatele de energie electrică o plajă de valori de temperatură cuprinsă între $-40^{\circ}C$ și $+85^{\circ}C$, în concordanță cu cerințele ce trebuie îndeplinite de aplicațiile electronice existente într-un autovehicul.

3.1.3 Criterii pentru alegerea tipului de baterie

O celulă sau baterie "ideală" trebuie să îndeplinească următoarele caracteristici: să fie ieftină, să aibă energie infinită, să susțină toate nivelele de putere necesare în aplicații, să poată opera la toate temperaturile și în orice condiții exterioare, să aibă durată de viață nelimitată și să fie sigură în exploatare. În

practică, datorită faptului că în timpul descărcării materialele active din interiorul bateriei se consumă, energia din interiorul bateriei nu este nelimitată, temperatura și curentul de descărcare afectează performanțele bateriei, iar durata de viață a celulei este influențată de reacțiile chimice și de modificările fizice care au loc în interiorul celulei, chiar dacă au loc treptat, în timpul depozitării ei.

Folosirea în interiorul bateriilor a materialelor proiectate special pentru a atinge densități mari de energie și de putere necesită precauții în timpul utilizării ei, pentru a evita abuzurile electrice și mecanice care duc la probleme în siguranța exploatarei acestora. Deși se cer baterii din ce în ce mai mici, cu densități din ce în ce mai mari de energie și de putere, tehnologia bateriilor are limite teoretice și practice în îndeplinirea acestor cerințe. O alegere eficientă și o utilizare adecvată a bateriilor este esențială pentru a obține performanțe optime pentru aplicația pe care acestea o alimentează.

Considerațiile care stau la baza alegerii unei baterii pentru o anumită aplicație sunt [3.4]:

- *Tipul bateriei*: primară sau secundară;
- *Sistemul electrochimic*: se analizează avantajele și dezavantajele caracteristicilor bateriilor și cerințele majore ale echipamentului alimentat și se armonizează cele două aspecte;
 - *Tensiunea*: tensiunea nominală, tensiunile minime și maxime necesare pentru aplicație, controlul tensiunii, profilul curbei de descărcare;
 - *Profilul și mărimea curentului de descărcare*: curent constant, rezistență de sarcină constantă sau putere constantă, valoarea sau curba curentului de sarcină;
 - *Factor de utilizare*: utilizare continuă sau intermitentă a bateriei;
 - *Cerințele de temperatură*: plaja de valori pentru temperatura de funcționare a bateriei;
 - *Timpul de funcționare*: intervalul de timp de funcționare necesar;
 - *Cerințe fizice*: formă, mărime, greutate;
 - *Condițiile de stocare*: sistem de baterii activ sau de rezervă; starea de încărcare în timpul depozitării; timpul de depozitare funcție de temperatură, umiditatea și alte condiții;
 - *Cicluri de încărcare/descărcare (dacă sistemul de baterii este reîncărcabil)*: valabilitatea și caracteristicile sursei de încărcare, curbă de sarcină ciclică sau aleatoare, eficiența încărcării, durata de viață sau numărul de cicluri încărcare/descărcare necesar;
 - *Condiții de mediu*: vibrații, șocuri, accelerații, condiții atmosferice (presiune, umiditate);
 - *Siguranță în exploatare*: utilizarea unor componente potențial periculoase sau toxice, rata de defectare, variabilități admisibile pentru aplicația pe care acestea o alimentează, operarea în condiții periculoase;
 - *Condiții de operare neuzuale sau foarte restrictive*: depozitare pe termen foarte lung sau la temperaturi extreme, dacă este necesară o acuratețe mare pentru aplicații speciale, activarea rapidă a bateriilor de rezervă, împachetare specială a bateriilor;
 - *Întreținere și aprovizionarea cu noi baterii*: achiziționarea ușoară a bateriilor, înlocuire ușoară a bateriilor, valabilitatea facilităților de încărcare a bateriilor,
 - *Costuri*: costuri inițiale, costuri pe durata de viață, utilizarea materialelor critice sau scumpe.

Ținând cont de toate cerințele prezentate anterior și luând în considerare tehnologiile pentru stocarea energiei electrice a căror caracteristici sunt prezentate în Tabelul. 1.1, pentru sistemul de rezervă de stocare a energiei electrice pentru alimentarea frânei electrice prezentate anterior s-a ales tehnologia Li-ion. Sistemul de frână electrică prezentat va avea un sistem de stocare a energiei electrice de rezervă alcătuit din două baterii, fiecare având 6 celule de tip Sony 26650 în conexiune serie.

Datele nominale ale acestui tip de celule sunt următoarele [3.5]:

Tensiunea nominală: 3,6 [V];
Capacitatea nominală: 2,5 [Ah] – pentru un curent de descărcare de 0,2C (=0,5[A]);
Tensiunea maximă de încărcare: 4,1 [V];
Impedanța internă măsurată în curent alternativ la frecvența de 1 [kHz]: 13 [mΩ];
Forma celulei: cilindrică;
Dimensiunile celulei: diametru: 26 [mm], înălțimea: 65[mm];
Masa: 89.5 [g];

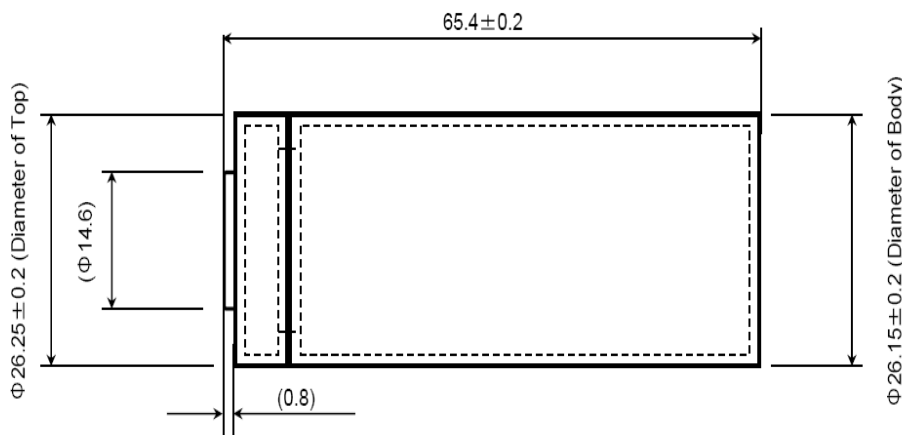


Fig. 3.4 Celula de tip Sony 26650VT [3.5]

3.2 Diagnosticarea în timp real a bateriei Li-ion utilizată ca baterie de rezervă pentru sistemul de frânare electric al autovehiculului

Funcționarea sistemului electric de frânare a autovehiculului la parametrii specificați de reglementările legale prezentate în paragraful 3.1 implică existența unui algoritm de diagnosticare precis și sigur pentru bateriile de rezervă folosite pentru stocarea energiei electrice necesare acestuia. Pe de altă parte, dacă algoritmul de diagnosticare este precis și sigur, atunci sunt necesare mai puține celule pentru baterie și implicit costul acestora și al întregului sistem scade.

La elaborarea algoritmului de diagnosticare a bateriilor trebuie să se țină seama atât de importanța aplicației pe care aceste baterii o alimentează, cât și de particularitățile mediului în care funcționează ansamblul baterii – electronica de comandă și control. Algoritmul rulează pe un microcontroler și prelucrează datele achiziționate în timp real de la senzori și dispozitivele de măsură. Pe baza acestor date se calculează acei parametri ai bateriei care evidențiază starea actuală a acesteia. Ținând cont de toate aceste aspecte, trebuie găsit cel mai bun compromis între precizia rezultatelor obținute în urma rulării algoritmului de diagnosticare și limitările legate de sistem (spațiu de memorie limitat, precizie limitată, timpul necesar calculului, etc.). În paragraful 2.3 sunt prezentate câteva metode de diagnosticare a bateriilor. Din aceste metode prezentate s-au ales acelea care sunt aplicabile mediului dat și pentru baterie se vor calcula acei parametri care evidențiază cel mai bine starea în care a ajuns bateria la un moment dat, ținând cont de cerințele aplicației specificate în paragraful 3.1.

Microcontrolerul dispune de un convertor analog numeric (ADC) pe 12 biți care furnizează valorile numerice ale semnalelor măsurate de la baterie: curentul bateriei, tensiunea totală a bateriei, tensiunile fiecărei celule în parte și temperatura pentru două puncte de la suprafața bateriei. Microcontrolerul și perifericele acestuia lucrează la o anumită frecvență, are un spațiu de memorie limitat iar prelucrarea datelor se face în interiorul unor funcții periodice (task-uri) cu recurență bine precizată. Pe baza datelor care sunt disponibile în exteriorul bateriei, algoritmul va calcula starea de încărcare a bateriei (SOC = state of charge), starea de sănătate a bateriei (SOH = state of health) și în final, pe baza parametrilor obținuți se determină starea de funcționare a bateriei (SOF = state of function), adică algoritmul decide dacă bateria este în stare sau nu să furnizeze energie electrică în cantitatea și la parametrii necesari unei acționări sigure a sistemului de frânare al autovehiculului în condițiile specificate de reglementările legale prezentate în paragraful 3.1.

3.2.1 Determinarea stării de încărcare a bateriei

Starea de încărcare a bateriei (SOC) arată procentual cantitatea de sarcină electrică existentă în baterie raportată la capacitatea maximă a bateriei [3.4].

Starea de încărcare a bateriei este determinată prin două procedee, în funcție de starea momentană a bateriei:

A. Dacă bateria este în stare de echilibru – asta înseamnă că bateria nu se află în proces de încărcare sau de descărcare și tensiunea la bornele ei este constantă în timp sau variază în timp cu o valoare sub limita specificată de producător, atunci se folosește tabelul cu valori fixe ale stării de încărcare în funcție de tensiunea de circuit deschis de la bornele bateriei (OCV – open circuit voltage) [3.7]:

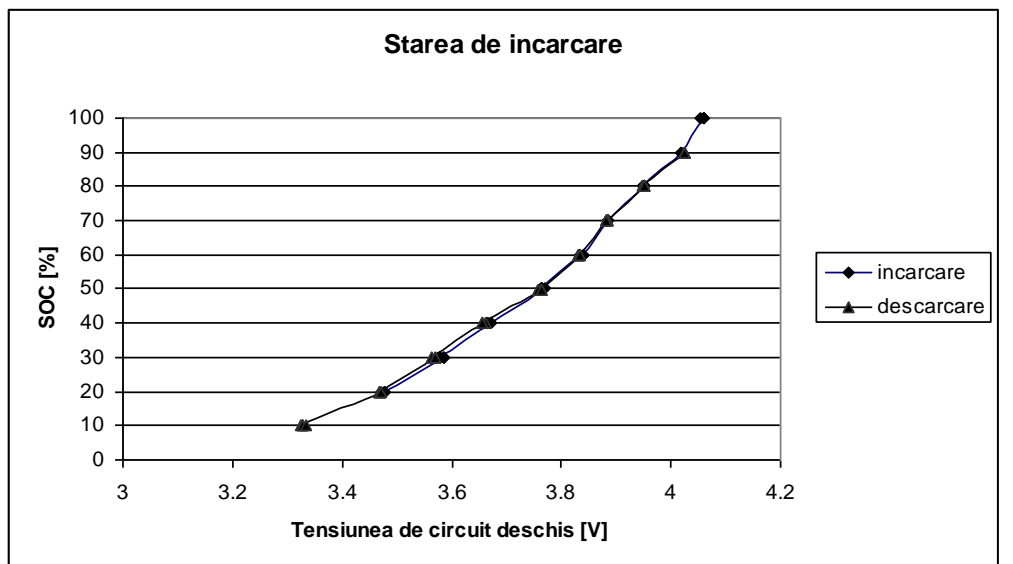


Fig. 3.5 Caracteristicile experimentale ale stării de încărcare a celulei de tip Sony Li-ion 26650 în funcție de tensiunea de circuit deschis

Curba prezentată în **Fig. 3.5** este determinată experimental și este stocată sub forma unui tabel cu valori fixe (look-up table), ca rezultat al mediei măsurărilor efectuate pe mai multe celule de același tip (Sony 26650). Pentru a afla starea de încărcare a unei celule la un moment dat, se măsoară tensiunea celulei și în funcție de valoarea măsurată se va citi din tabelul de valori starea de încărcare corespunzătoare. Pentru valorile tensiunii care sunt între valorile stocate în tabel se va interpola liniar pentru determinarea stării de încărcare corespunzătoare valorii de tensiune măsurate. Starea de încărcare se determină pentru fiecare celulă din componența bateriei, pentru a avea o mai mare acuratețe a determinărilor. După ce s-a determinat starea de încărcare a fiecărei celule, se verifică să nu existe diferențe între valorile stării de încărcare mai mari de 5% între celulele care alcătuiesc o baterie. Starea de încărcare a bateriei va fi media aritmetică a stărilor de încărcare a celulelor.

Caracteristica a fost trasată în timpul proceselor de încărcare și respectiv descărcare cu un curent constant prescris de 2[A]. Măsurătorile s-au efectuat după ce s-a încărcat sau descărcat câte 10% din capacitatea celulei, timpul de așteptare până la efectuarea măsurătorii fiind de 30 minute pentru fiecare măsurătoare. Se observă din cele două caracteristici trasate că nu există diferențe notabile între cele două procese, acest tip de celule nu prezintă histerezis.

B. Dacă bateria nu este în stare de echilibru – asta înseamnă că bateria este în proces de încărcare, descărcare sau în timpul procesului de relaxare, când nu trece curent prin baterie, dar tensiunea la bornele acesteia se modifică în timp mai mult decât o anumită valoare specificată de producător.

În acest caz starea de încărcare a bateriei se determină măsurând curentul care trece prin baterie și făcând integrarea acestuia în timp. Se va ține cont de sensul curentului: curentul de descărcare se consideră cu semnul minus, cel de încărcare cu plus [3.7]:

$$Q = \int i(t)dt \text{ [Ah]} \quad (3.1)$$

Contorul amperi-oră calculat cu relația (3.1) ne arată ce cantitate de sarcină electrică Q s-a vehiculat prin baterie. Ținând cont de semnele convenționale alese pentru sensul curentului (minus pentru descărcare și plus pentru încărcare) starea actuală de încărcare a bateriei se poate calcula cu relația:

$$SOC = SOC_{init} + \frac{Q}{Q_{max}} * 100 \text{ [%]} \quad (3.2)$$

Unde Q_{max} reprezintă cantitatea maximă de sarcină care poate fi stocată în baterie când aceasta este complet încărcată, Q reprezintă valoarea contorului de sarcină la momentul calculării stării de încărcare și SOC_{init} reprezintă starea de încărcare a bateriei la momentul inițial, când s-a început procesul de încărcare sau de descărcare a acesteia.

Datorită faptului că integrăm în timp valoarea curentului este necesar ca determinarea acestuia să se facă cu cât mai mare precizie. Erorile care se acumulează în timp se datorează atât erorilor de măsurare cât și celor datorate sensibilității limitate a convertorului analog-numeric. De aceea, sistemul trebuie recalibrat din timp în timp. Starea de încărcare a bateriei determinată prin această metodă trebuie resetată din timp în timp în punctul sau punctele de calibrare la o valoare (valori) prestabilită(e). De obicei se aleg punctele în care bateria este complet descărcată sau complet încărcată, alegându-se condiții pentru determinarea acestor puncte (tensiunea bateriei scade sub o anumită valoare sau curentul de încărcare scade sub o anumită valoare). Datorită faptului că la celulele de tip Li-ion Sony 26650 caracteristica stării de încărcare funcție de tensiunea de circuit deschis are o pantă suficient de pronunțată pentru a se putea determina starea de încărcare pe baza măsurării acestei tensiuni, de fiecare dată când bateria se află în stare de echilibru starea de încărcare a acesteia se va reseta la valoarea determinată pe baza metodei prezentate la punctul **A**. În timpul funcționării autovehiculului starea bateriei va fi monitorizată permanent și de fiecare dată când aceasta se află în echilibru, se măsoară tensiunea de circuit deschis, iar starea de încărcare se determină pe baza tabelului cu valori fixe, folosind interpolarea acolo unde este cazul.

3.2.2 Determinarea stării de sănătate a bateriei

Starea de sănătate a bateriei (SOH) este un indicator al punctului care a fost atins în ciclul de viață al bateriei și o măsură a condiției ei în comparație cu o baterie nouă [3.4].

Cunoscând faptul că bateria începe să se degradeze din momentul în care aceasta a fost produsă, este important de știut la fiecare moment de timp parametrii acesteia și de asemenea este important ca aceștia să se compare cu parametrii nominali ai bateriei, parametrii care sunt specificați de către producător pentru o baterie nouă.

Pentru determinarea stării de sănătate a unei baterii de tip Li-ion 26650 utilizată ca sistem de rezervă de stocare a energiei electrice pentru sistemul de frânare electric prezentat anterior, s-au ales doi parametri ai bateriei, care s-au considerat importanți pentru stabilirea stării de sănătate a acesteia: cantitatea de sarcină electrică maximă utilă actuală a bateriei și valoarea rezistenței interne a bateriei [3.7]. Primul parametru este o măsură a energiei electrice care poate fi

furnizată de baterie, cel de-al doilea parametru reprezintă o măsură a puterii electrice momentane care poate fi furnizată de baterie. Pentru acuratețea determinărilor este foarte important ca măsurătorile de date de la baterie să se facă de fiecare dată în aceleași condiții, iar dacă acest lucru nu este posibil, să se apeleze la factori sau funcții de corecție.

A. Determinarea rezistenței interne a bateriei

Un factor important care afectează puternic performanțele bateriei este valoarea rezistenței interne a acesteia. Rezistența internă cauzează o cădere de tensiune în timpul funcționării bateriei, ceea ce consumă o parte din energia electrică utilă a bateriei sub formă de pierderi de căldură.

În literatura de specialitate sunt prezentate diferite metode pentru determinarea rezistenței interne a bateriilor – vezi paragraful 2.3.1, punctul C - cea mai des întâlnită fiind spectroscopia de impedanță electrochimică (EIS). Deși sunt foarte utile în înțelegerea fenomenelor care au loc în interiorul bateriei, pentru studierea și proiectarea unor noi tipuri de baterii, aceste metode sunt metode off-line, de laborator, necesită timp și aparatură specializată și nu sunt potrivite pentru cerințele unui sistem de diagnosticare a bateriilor în timp real (on-line).

Analizând forma curbei tensiunii la bornele bateriei după aplicarea curentului de descărcare – vezi **Fig.3.6** – s-a constatat că aceasta prezintă o zonă în care tensiunea are o cădere bruscă, instantanee – aceasta corespunde căderii de tensiune pe rezistența electrică internă a bateriei, urmată de zone în care panta de descădere a tensiunii scade, aceste zone corespunzând fenomenelor electrochimice care au loc în interiorul bateriei în timpul descărcării acesteia (polarizare, transfer de sarcină, difuzie, etc.) [3.6]. Această formă a curbei tensiunii de descărcare la curent constant (10 [A]) evidențiază faptul că în interiorul bateriei se desfășoară fenomene electrochimice care au constante de timp diferite. Diferența dintre valoarea tensiunii de mers în gol a bateriei și valoarea actuală a tensiunii la bornele bateriei reprezintă căderea de tensiune pe rezistența internă a bateriei. În funcție de alegerea momentului la care se măsoară tensiunea la bornele bateriei, utilizând relația (3.3), vom obține altă valoare pentru rezistența internă a bateriei, implicit, această rezistență va evidenția alte fenomene care au loc în interiorul bateriei în timpul descărcării acesteia. Pentru ca această determinare să fie relevantă pentru diagnosticarea bateriei, valoarea curentului de descărcare aplicat trebuie să fie comparabilă cu valoarea curentului cerut de aplicație. De asemenea, de fiecare dată când se face această determinare este important să se facă după *aceiași* interval de timp după aplicarea curentului de descărcare, în caz contrar rezultatele obținute vor diferi mult. În **Fig. 3.6** s-au reprezentat curbele tensiunii la bornele bateriei și curentului prin baterie înainte și după aplicarea unei trepte de curent de descărcare pentru două temperaturi diferite ale bateriei: 20 °C și -20 °C.

Valoarea rezistenței interne a bateriei se determină cu relația:

$$|R_{int}(\theta)|_{t_{desc}} = \frac{U_{OCV} - U_{bat}|_{t_{desc}}}{I_{desc}} \quad [\Omega] \quad (3.3)$$

t_{desc} – este momentul la care se face măsurarea tensiunii și curentului bateriei, după aplicarea curentului de descărcare;

θ – temperatura bateriei la momentul aplicării treptei de curent de descărcare;

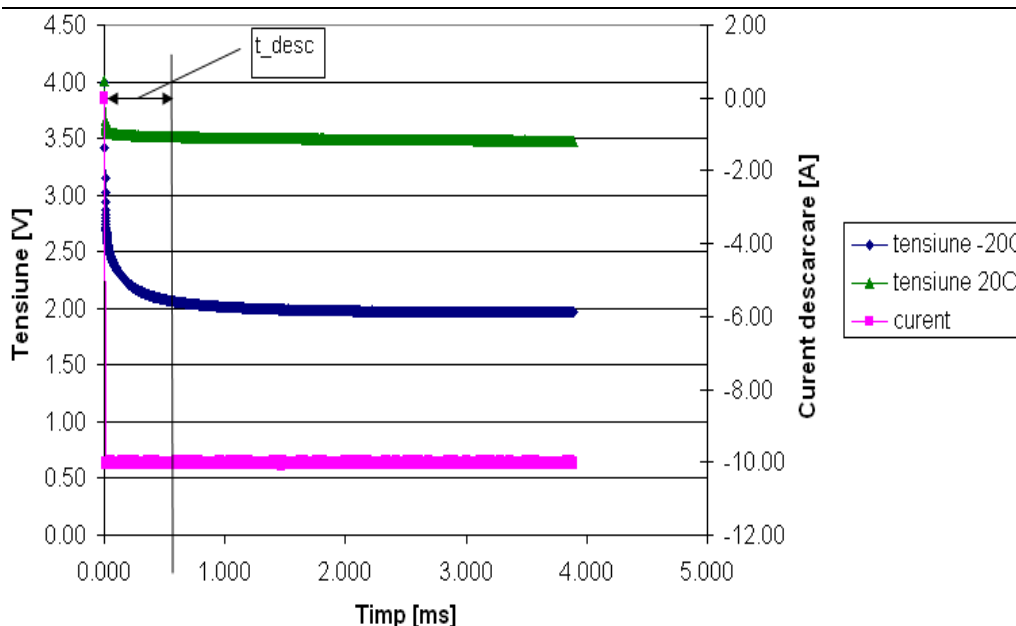


Fig. 3.6 Tensiunea unei baterii de tip Li-ion Sony 26650 în timpul descărcării cu un curent constant de 10[A] la două temperaturi diferite: 20 °C și -20 °C

Momentul de timp la care se fac măsurătorile de curent și de tensiune, după aplicarea curentului de descărcare, se va stabili în funcție de cerințele aplicației și în concordanță cu curba de sarcină corespunzătoare acesteia [3.9]. Curba de sarcină pentru aplicația pe care o alimentează bateriile Li-ion 26650 este prezentată în **Fig. 3.3**. Curentul maxim cerut de aplicație I_{MAX} este necesar pentru 600 [ms], deci un interval de timp de ordinul sutelor de milisecunde pentru măsurarea tensiunii la bornele bateriei și a curentului bateriei ar fi o alegere potrivită pentru estimarea valorii rezistenței interne a bateriei utilizată în aplicația în cauză.

Un alt factor important care influențează valorile obținute pentru acest parametru este temperatura bateriei când se face această determinare. Valoarea rezistenței interne a bateriei scade odată cu creșterea temperaturii datorită intensificării reacțiilor chimice din interiorul bateriei. Compararea valorilor obținute pentru rezistența internă a bateriei trebuie să țină cont de acest factor și să realizeze corecțiile corespunzătoare pentru a compara valorile rezistenței interne de la două momente de timp diferite, dar corespunzătoare aceleiași temperaturi.

Valoarea rezistenței interne a bateriei obținută cu relația (3.3) trebuie comparată cu valoarea maxim admisibilă pentru rezistența internă a bateriei la aceeași temperatură și următoarea condiție trebuie verificată:

$$R(\theta) < R_{max}(\theta) \quad (3.4)$$

Dacă această condiție este îndeplinită, înseamnă că starea de sănătate a bateriei - din punctul de vedere al rezistenței interne - corespunde necesităților aplicației.

Determinarea valorii maxim admisibile pentru rezistența internă a bateriei se face ținând cont de cerințele aplicației și de plaja de valori ale temperaturii de funcționare a bateriei dată de producător. Pentru bateriile tip Li-ion Sony 26650 plaja de temperaturi dată de producător este între -20⁰C și +60⁰C. Condiția de

funcționare cea mai defavorabilă este pentru temperatura de -20°C . Deci și pentru această temperatură bateria trebuie să fie capabilă să furnizeze energie electrică la parametrii ceruți de aplicație pentru o acționare sigură a sistemului de frânare.

Din testele efectuate cu bateria Li-ion Sony 26650 s-a constatat că la temperatura de -20°C bateria nu este capabilă să furnizeze curentul maxim cerut de aplicație (vezi **Fig.3.7**).

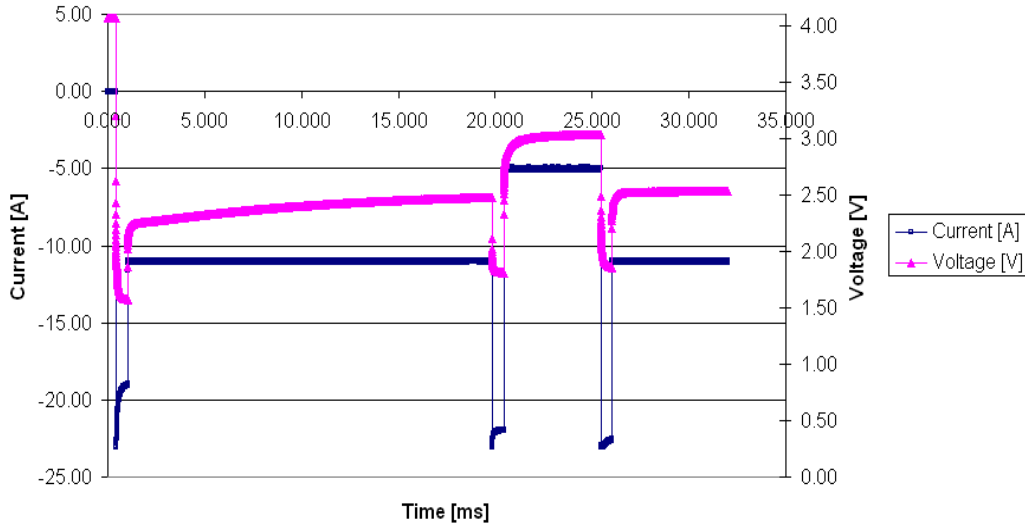


Fig. 3.7 Tensiunea și curentul de descărcare pentru o baterie de tip Li-ion Sony 26650 în timpul descărcării cu profil de curent corespunzător ciclurilor de frânare, pentru temperatura -20°C

Deși bateriei i s-a prescris regim de descărcare cu curent corespunzător ciclurilor de frânare – vezi **Fig.3.3**, aceasta nu poate susține descărcarea cu curentul maxim prescris, iar tensiunea la bornele unei celule scade sub $2[\text{V}]$ în timpul descărcării cu curent maxim. S-au încercat descărcări la temperaturi peste -20°C : -18°C și -15°C . Abia începând cu -15°C parametrii energiei furnizate de baterie corespund aplicației alimentate de aceasta, de aceea, în continuare, s-a stabilit ca temperatură minimă de referință pentru funcționarea în bune condiții a bateriei temperatura de -10°C . În cazul în care temperatura mediului ambiant în care funcționează bateria este sub această valoare, atunci bateria trebuie prevăzută cu un sistem suplimentar destinat managementului termic al bateriei pentru aducerea acesteia la o temperatură optimă de funcționare (cel puțin -10°C).

Valoarea rezistenței maxim admisibile pentru baterie la temperatura de -10°C se calculează cu ajutorul datelor concrete ale aplicației, necesare circuitului de frânare, utilizând relația (3.5):

$$R_{max}(-10^{\circ}) = \frac{U_{max_bat} - U_{minim_necesar_aplicatie}}{I_{max}} \quad [\Omega] \quad (3.5)$$

$U_{max_bat} = 6 \cdot 4.08 = 24.48 [\text{V}]$ - este tensiunea bateriei când aceasta este complet încărcată;

$U_{minim_necesar_aplicatie} = 10 [\text{V}]$ - este tensiunea minimă necesară circuitului de frânare pentru ca acesta să realizeze parametrii de frânare specificați;

$I_{max} = 23 \text{ [A]}$ - este curentul maxim necesar circuitului de frânare, descărcat din baterie în timpul frânării;

Cu datele numerice de mai sus, valoarea maximă a rezistenței la temperatura de -10°C se obține:

$$R_{max}(-10^{\circ}) = 630 \text{ [m}\Omega\text{]}$$

Pentru aflarea valorii rezistenței maxim admisibile la temperatura θ se folosește coeficientul de temperatură al rezistenței interne a bateriei $K(\theta)$:

$$K(\theta) = \frac{R(\theta)}{R(-10^{\circ})} \quad (3.6)$$

Pentru bateria de tip Li-ion Sony 26650 s-au determinat experimental caracteristicile $K(\theta)$ pentru valori ale temperaturii cuprinse între -10°C și 60°C , curenți de descărcare de 23A, 15A, 10A, 7A și 2.5A, pentru două momente diferite la care se măsoară tensiunea bateriei, după aplicarea curentului de descărcare: 2 [ms] și 500 [ms]. Aceste caracteristici se prezintă în **Fig. 3.8**:

Coeficientul de temperatură al rezistenței pentru diversi curenți de descărcare

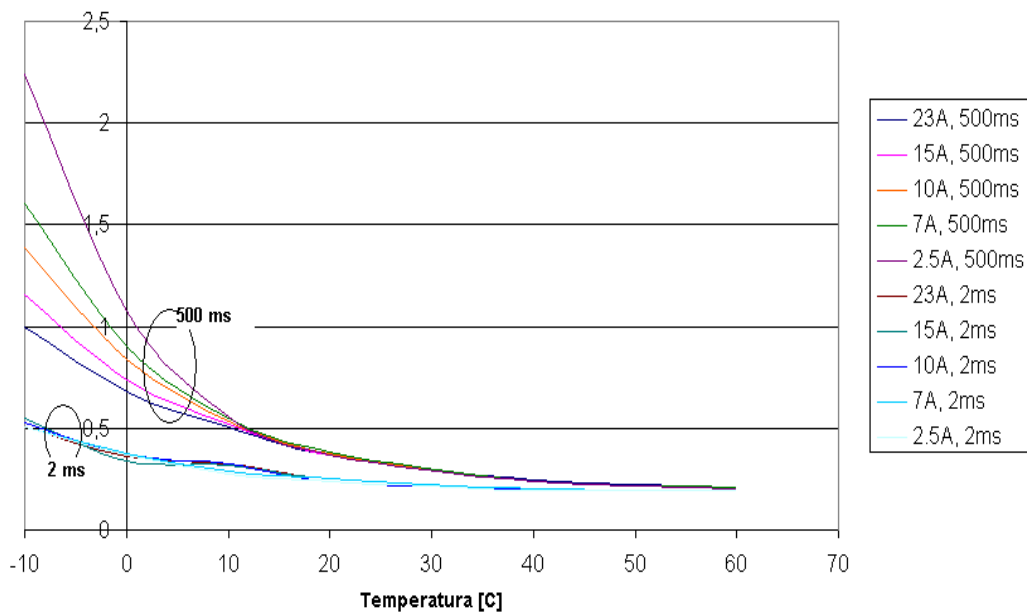


Fig. 3.8 Variația coeficientului de temperatură al rezistenței interne a bateriei Li-ion Sony 26650

Se observă în **Fig. 3.8** două familii de caracteristici: una pentru valori ale coeficientului de temperatură al rezistenței interne corespunzătoare unui interval de timp de 500ms între momentul descărcării și momentul la care s-au măsurat tensiunea și curentul bateriei și cealaltă pentru un interval de 2ms între momentul descărcării și momentul la care s-au măsurat tensiunea și curentul bateriei. Se observă din curbele prezentate în **Fig. 3.8** că este foarte important intervalul de

timp după care se face măsurarea tensiunii. De asemenea, pentru temperaturi mai mici de 10 °C trebuie să se precizeze și valoarea curentului descărcat de la baterie, valoarea rezistenței interne a bateriei depinzând de această valoare. Pentru aplicația de frână electrică a fost ales un interval de timp de 500ms, acest interval de timp fiind în strânsă corelație cu curba de sarcină prezentată în **Fig. 3.3**, mai precis cu intervalul de timp în care bateria este descărcată cu curentul maxim ($I_{MAX}=23[A]$), rezistența internă a bateriei calculată pentru acest interval de timp fiind considerată relevantă pentru aplicație.

În **Fig. 3.9** sunt prezentate caracteristicile rezistenței interne a bateriei în funcție de temperatura acesteia pentru diverși curenți de descărcare, estimată după 500ms de la aplicarea curentului de descărcare.

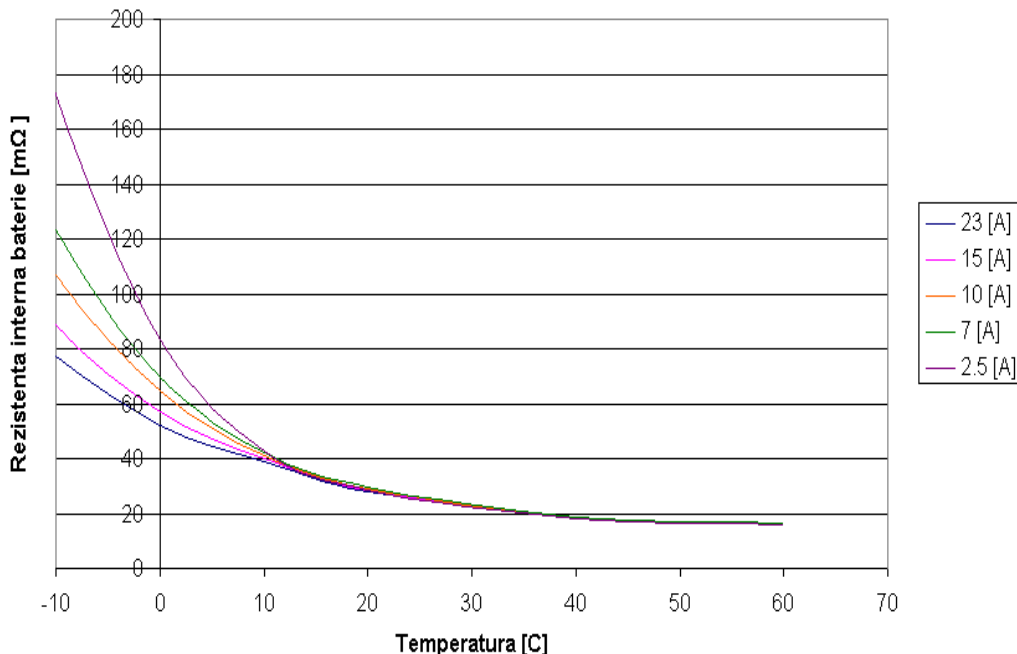


Fig.3.9 Variația rezistenței interne a bateriei corespunzătoare intervalului de timp de 500ms cu temperatura pentru diverși curenți de descărcare

Caracteristicile prezentate în **Fig. 3.8** sunt salvate sub forma unui tabel cu valori fixe și în funcție de temperatura bateriei măsurată de senzorii de temperatură și de curentul de descărcare, se determină valoarea acestui coeficient. Valoarea rezistenței interne maxim admisibile a bateriei pentru temperatura θ se calculează cu relația (3.7):

$$R_{max}(\theta) = K(\theta) * R_{max}(-10^0) [\Omega] \quad (3.7)$$

În funcție de temperatura măsurată de senzorii de temperatură, se va citi din tabel valoarea corespunzătoare pentru coeficientul de temperatură care se înmulțește cu valoarea maxim admisibilă a rezistenței pentru temperatura de -10^0 C (care este o valoare fixă, caracteristică aplicației). Valoarea obținută reprezintă rezistența maximă admisibilă a bateriei pentru temperatura actuală a bateriei, θ .

B. Determinarea capacității maxime bateriei

Trebuie făcută o distincție între cantitatea de sarcină existentă la un moment dat în baterie și cantitatea de sarcină care este disponibilă, utilă, în afara bateriei și care diferă în funcție de condițiile existente la momentul descărcării: valoarea curentului de descărcare, temperatura bateriei, starea de degradare a bateriei, etc. În funcție de aceste condiții, cantitatea de sarcină utilă a bateriei este mai mică decât cantitatea de sarcină prezentă în baterie. Cantitatea de sarcină utilă se estimează ținând cont și de condițiile existente la momentul descărcării. Aceasta poate diferi mult de la o temperatură la alta, la temperaturi mici cantitatea de sarcină disponibilă este mai mică decât la temperaturi mari.

Pentru determinarea capacității maxime disponibile a bateriei în timpul funcționării autovehiculului, se va efectua o descărcare controlată a bateriei pentru un timp precizat (ex: 10 minute), cu un curent de descărcare constant (2 [A]). Pentru ca această determinare să fie cât mai precisă este necesar ca înainte de începerea descărcării controlate bateria să fie în stare de echilibru. După cum se vede în **Fig. 3.10** punctul 1 este punctul de start al descărcării, caracterizat de valorile stării de încărcare a bateriei dinaintea momentului începerii descărcării (SOC1) și valoarea contorului de sarcină (Q1).

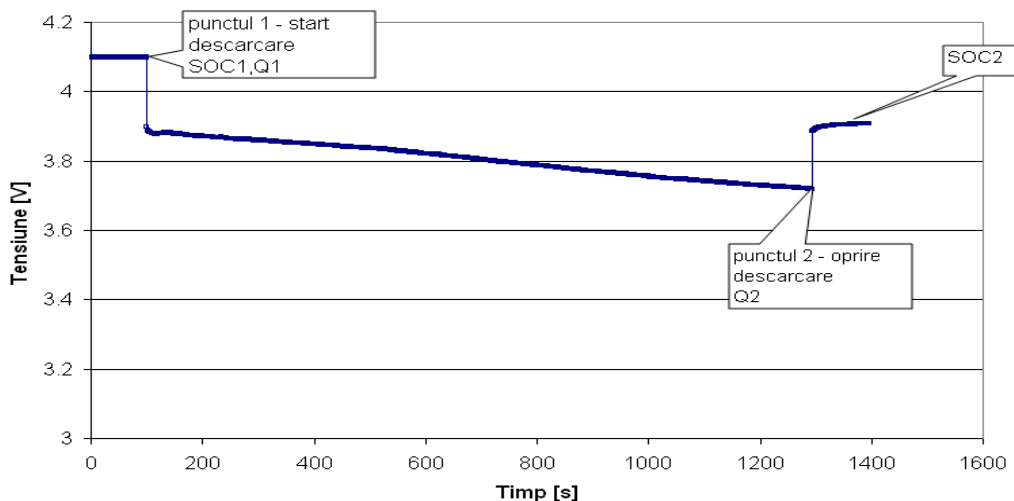


Fig. 3.10 Caracteristica tensiunii bateriei Li-ion Sony 26650 în timpul probei de descărcare cu curent constant de 2[A]

Punctul 2 este punctul de oprire a descărcării. În punctul 2 se va citi valoarea contorului de sarcină Q2 și, după ce bateria a ajuns în starea de echilibru, se determină SOC2 pe baza măsurării tensiunii de mers în gol a bateriei.

Pentru determinarea valorii cantității de sarcină disponibilă în exteriorul bateriei se vor extrapola datele obținute în urma testului de descărcare a bateriei cu ajutorul relației (3.8):

$$Q_{max} = \frac{Q2 - Q1}{SOC2 - SOC1} * 100 \text{ [Ah]} \quad (3.8)$$

Unde contorul amperi-oră se calculează prin integrarea în timp a curentului de descărcare în timpul desfășurării probei de descărcare:

$$Q = \int i(t) dt \text{ [Ah]} \quad (3.9)$$

Cu ajutorul relației (3.8) se determină cantitatea de sarcină electrică utilă, corespunzătoare unei descărcări de 100% a bateriei. Acest procedeu de descărcare în scopul determinării cantității de sarcină utilă maximă a bateriei se face rar, o dată pe lună sau o dată la două luni. Estimarea capacității maxime disponibile a bateriei este necesară permanent în timpul funcționării autovehiculului. Între momentele când se face proba de descărcare pentru determinarea capacității maxime a bateriei, estimarea acestei mărimi se face ținând cont de valoarea obținută la ultimul test de descărcare și de temperatura la care se află bateria. Cantitatea de sarcină electrică disponibilă depinde de temperatura bateriei, ea fiind cu atât mai mică cu cât temperatura este mai scăzută. În Fig. 3.11 se pot vedea curbele tensiunii bateriei pentru descărcarea acesteia cu curent constant 2 [A] la trei temperaturi diferite: -10°C , 0°C și 40°C . Se pot vedea diferențe clare atât între valoarea tensiunii bateriei în timpul descărcării cât și între valorile capacităților maxime disponibile corespunzătoare celor trei temperaturi.

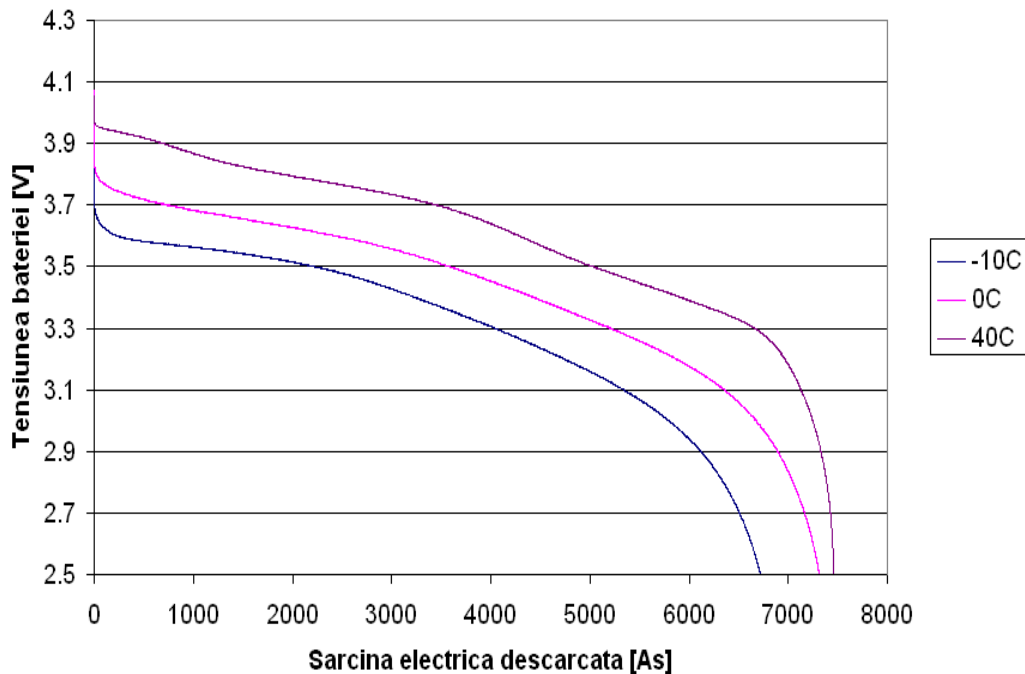


Fig. 3.11 Curbele tensiunii la bornele bateriei în timpul descărcării acesteia cu curent constant de 2 [A], la diferite temperaturi

3.2.3 Determinarea stării de funcționare a bateriei

Starea de funcționare a bateriei (SOF) este estimată pe baza parametrilor bateriei calculați anterior: starea de încărcare, rezistența internă și cantitatea maximă utilă de sarcină electrică a bateriei. Aceasta indică dacă bateria este capabilă să furnizeze energie electrică aplicației astfel încât să se atingă performanțele necesare sistemului de frânare în condițiile precizate de normele legale în vigoare: cel puțin 5 cicluri de frânare cu decelerația $9,8[\text{m/s}^2]$ [3.3].

Fiecare ciclu de frânare constă dintr-o acționare a frânei 20 de secunde și eliberarea ei pentru următoarele 5 secunde, după cum este ilustrat și în **Fig. 3.1** și **3.3.**, în condițiile în care sistemul de frânare este alimentat numai de la sistemul de rezervă de stocare a energiei electrice. Bateriile trebuie să fie în stare să furnizeze cel puțin energia necesară acestui scenariu de frânare, cantitatea de sarcină electrică necesară pentru 5 cicluri de frânare consecutive se notează $Q_{5_cicluri_franare}$ și se calculează pentru fiecare tip de autovehicul în parte.

În concluzie, starea de funcționare a bateriei se consideră îndeplinită dacă toate condițiile următoare sunt îndeplinite:

- La momentul actual bateria trebuie să dispună de o capacitate utilă cel puțin egală cu capacitatea necesară pentru 5 cicluri de frânare:

$$SOC[\%] * Q_{max_actual} \geq Q_{5_cicluri_franare} \quad (3.22)$$

- Rezistența internă a bateriei la momentul actual la temperatura θ trebuie să aibă o valoare sub valoarea maximă calculată pentru aceeași temperatură θ :

$$R_{int}(\theta) < R_{max}(\theta) \quad (3.23)$$

- Capacitatea maximă a bateriei trebuie să fie cel puțin 80% din capacitatea maximă inițială a bateriei, valoare care este specificată de producător, pentru aceeași temperatură de funcționare [3.4]:

$$Q_{max_actual}|\theta > 0.8 * Q_{max_no_min}|\theta \quad (3.24)$$

Dacă cel puțin una din condițiile anterioare nu este satisfăcută atunci bateria nu îndeplinește condițiile necesare furnizării energiei electrice la parametrii ceruți de aplicație și acest fapt trebuie semnalizat prin dispozitivele de avertizare și trebuie luate măsurile potrivite pentru remedierea situației: reîncărcarea bateriilor sau înlocuirea imediată a acestora.

3.3 Implementarea algoritmului de diagnosticare

3.3.1 Considerații preliminare

Algoritmul de diagnosticare prezentat anterior trebuie executat de un microcontroler în timp real, în timpul funcționării autovehiculului. Soluția propusă în capitolul 3.2 a ținut cont de acest aspect și a luat în considerare atât limitările legate de sistem (memorie limitată, execuția calculelor în interiorul unor funcții având recurența bine precizată, valabilitatea datelor măsurate, sensibilitatea ADC-ului, etc.), de complexitatea fenomenelor fizice și chimice și transformărilor din interiorul bateriei, cât și necesitatea elaborării unui algoritm sigur și precis, condiții care sunt impuse de importanța aplicației pentru siguranța utilizatorilor. Datele disponibile în exteriorul bateriei sunt: tensiunea totală a bateriei, curentul bateriei, tensiunea fiecărei celule și temperatura de la suprafața bateriei. Toate aceste date sunt furnizate algoritmului de diagnosticare prin intermediul convertorului analog – numeric (ADC) pe 12 biți al microcontrolerului, acest ADC având posibilitatea măsurării pe două canale în același timp. Această caracteristică se folosește la estimarea rezistenței interne a bateriei, prin măsurarea simultană a tensiunii bateriei și a curentului de descărcare al bateriei.

Pentru implementarea acestui algoritm s-a ales programul Matlab/Simulink împreună cu mediul SDA (System Design Automation). SDA este un concept de modelare a funcțiilor având o arhitectură modulară care a fost dezvoltat în interiorul companiei Continental. Mediul SDA este imaginea funcțională a sistemului de operare al microcontrolerului. Acest SDA a fost conceput pentru ca, încă de la începutul modelării/simulării, algoritmi să fie gândiți ținând cont de faptul că în final aceștia vor rula pe un microcontroler. Toate semnalele de intrare, de ieșire și cele interne, locale ale algoritmului trebuie definite cu nume, tip (cu semn, fără semn, pe 16 biți sau 32 biți) și plajă de valori.

Arhitectura întregului model constă în patru mari părți: **STI** – stimuli signals – aici sunt toate semnalele de intrare necesare simulării algoritmului în buclă deschisă; **PRJ** – controlerul – partea principală a modelului, conține descrierea funcțională completă a algoritmului, simulează sistemul de operare, ordinea apelării tuturor funcțiilor și recurența cu care se apelează acestea și este utilizat pentru generarea automată a codului care va fi implementat pe microcontroler; **DISP** – modulul display – aici se găsesc toate blocurile necesare vizualizării semnalelor de ieșire; **PLA** – the plant – reprezentarea sistemului real, necesar pentru simularea în buclă închisă a algoritmului – nu este utilizat pentru acest proiect. În **Fig. 3.12** se poate vedea acest model de arhitectură, POWM însemnând Power Management – numele proiectului în care este integrat algoritmul de diagnosticare a bateriilor:

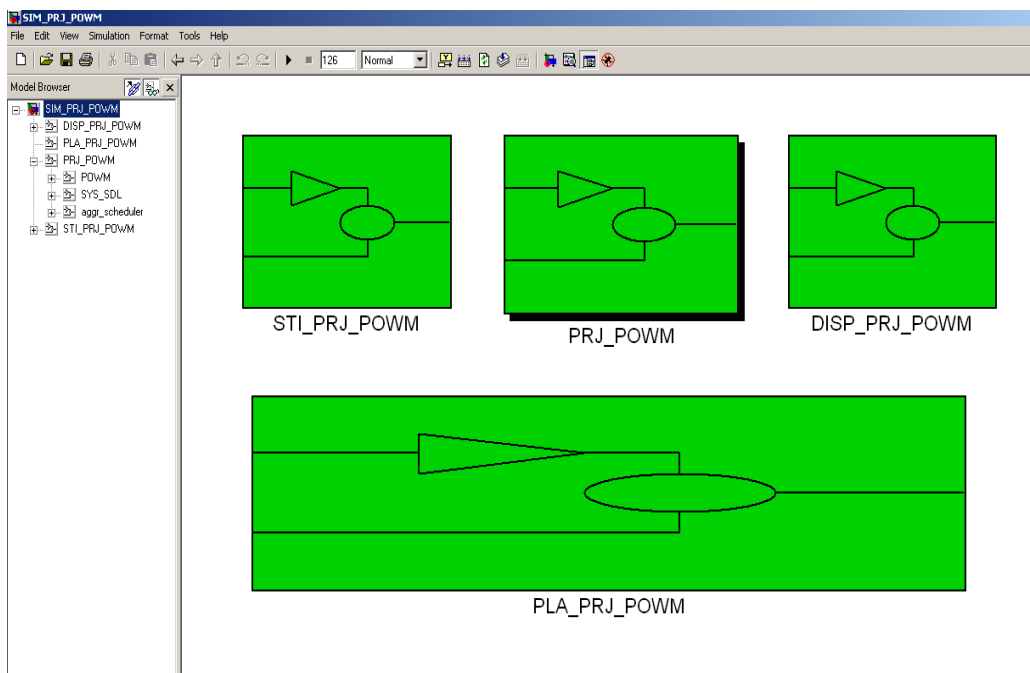


Fig. 3.12 Proiect dezvoltat în Matlab/Simulink folosind mediul SDA

Pentru a se înțelege mai bine particularitățile modelării și simulării proceselor cu ajutorul SDA se va explica în continuare conceptul de programator de sistem (System Scheduler):

Blocul System Scheduler SYS-SDL este unitatea centrală care cheamă funcțiile în recurențele necesare (task-uri). Fiecare nivel din ierarhia proiectului are un

programator (scheduler) care redistribuie recurența chemării funcțiilor către nivelul ierarhic de mai jos – vezi **Fig. 3.13** de mai jos.

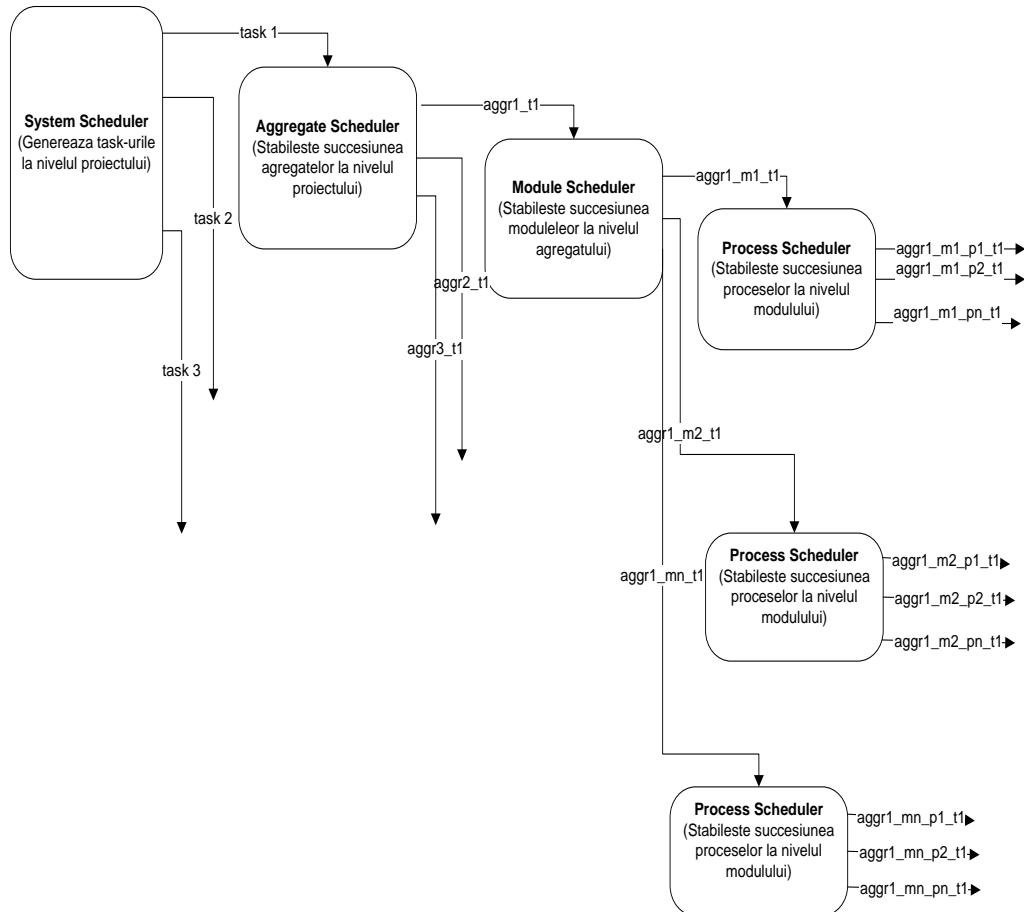


Fig. 3.13 Ordinea de execuție a modulelor dintr-un proiect dezvoltat in mediul SDA

Ordinea de execuție: programatorul de sistem apelează programatorul de la nivelul agregatelor, care la rândul lui apelează programatorul de la nivelul modulelor, care mai apoi apelează programatorul de proces din interiorul modulelor. Dacă în interiorul modulului avem un singur proces, atunci nu mai este necesar programatorul de proces.

Caracteristica de bază a modelării utilizând mediul SDA o constituie posibilitatea unei complete ordonări a informației și un control complet al ordinii de execuție a calculelor. Următoarele aspecte trebuie avute în vedere când se realizează un model Matlab/Simulink în mediul SDA:

- Toate evenimentele de sistem (System Events) sunt valabile pentru programatorul de sistem (System Scheduler);
- Fiecare model SDA are un programator al agregatului care stabilește și controlează ordinea de calcul a agregatelor corespunzătoare fiecărui eveniment de sistem apărut.

- Fiecare agregat are un programator de modul care stabilește și controlează ordinea de calcul a modulelor corespunzătoare fiecărui eveniment de sistem;
 - În fiecare modul trebuie să existe obligatoriu un bloc Application Condition. Acest bloc controlează informațiile despre condițiile de activare/dezactivare ale modului, recurența procesului, condițiile de inițializare și de apelare ale modului.
- Întregul algoritm de diagnosticare descris în capitolul 3.2 a fost împărțit în mai multe funcții, fiecare funcție fiind dezvoltată în interiorul unui modul. Modulele SDA ale algoritmului de diagnosticare sunt următoarele:
- STATUS – modulul care determină starea actuală a bateriei;
 - AHCNT – modulul care calculează valoarea contorului de sarcină (amperi-oră) și valoarea rezistenței interne a bateriei;
 - SOHCAP – modulul care calculează valoarea capacității maxime a bateriei în timpul testului de descărcare a bateriei;
 - SOCDT – modulul care calculează starea de încărcare momentană a bateriei;
 - SOFBUB – modulul pentru determinarea stării de funcționare a bateriei;
- În **Fig. 3.14** este prezentată schema bloc a algoritmului de diagnosticare și legăturile dintre modulele care alcătuiesc acest algoritm:

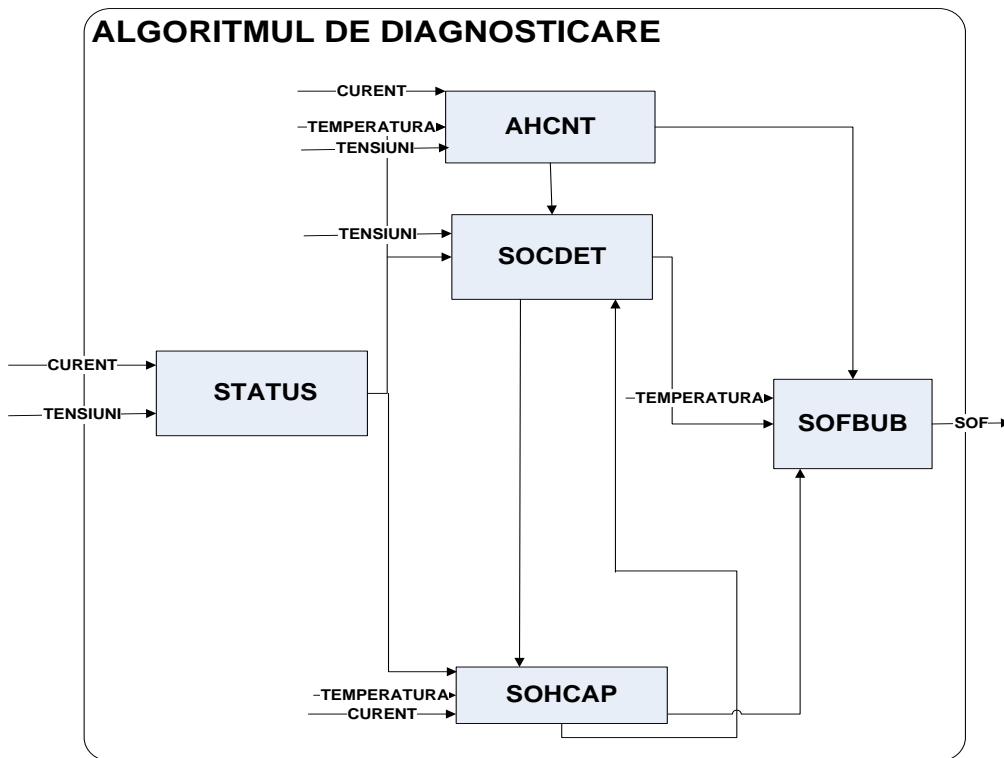


Fig. 3.14 Schema bloc a algoritmului de diagnosticare implementat în Matlab/Simulink

Algoritmul de diagnosticare prezentat se efectuează pentru fiecare din cele 2 baterii de rezervă, modulele având specificați indicii 1 respectiv 2.

Fiecare modul are trei părți distincte: **APP_CND** – application condition – în interiorul acestui bloc se specifică recurența funcției (care este intervalul de timp la care este chemată această funcție) și condițiile de resetare a acesteia; **OPM** – operation manager – în interiorul acestui bloc este dezvoltat algoritmul funcției; **INI** – initialization – în interiorul acestui bloc trebuie specificate valorile inițiale ale semnalelor de ieșire. În **Fig. 3.15** este prezentat, ca exemplu, modulul care determină starea în care se găsește una dintre baterii, STATUS1. Pe baza datelor măsurate de la baterie, în acest modul se stabilește dacă bateria este în stare de echilibru sau nu. Blocul *Signal Manager* asigură că întotdeauna vor fi furnizate în exterior către celelalte module cele mai noi valori calculate ale semnalelor de ieșire.

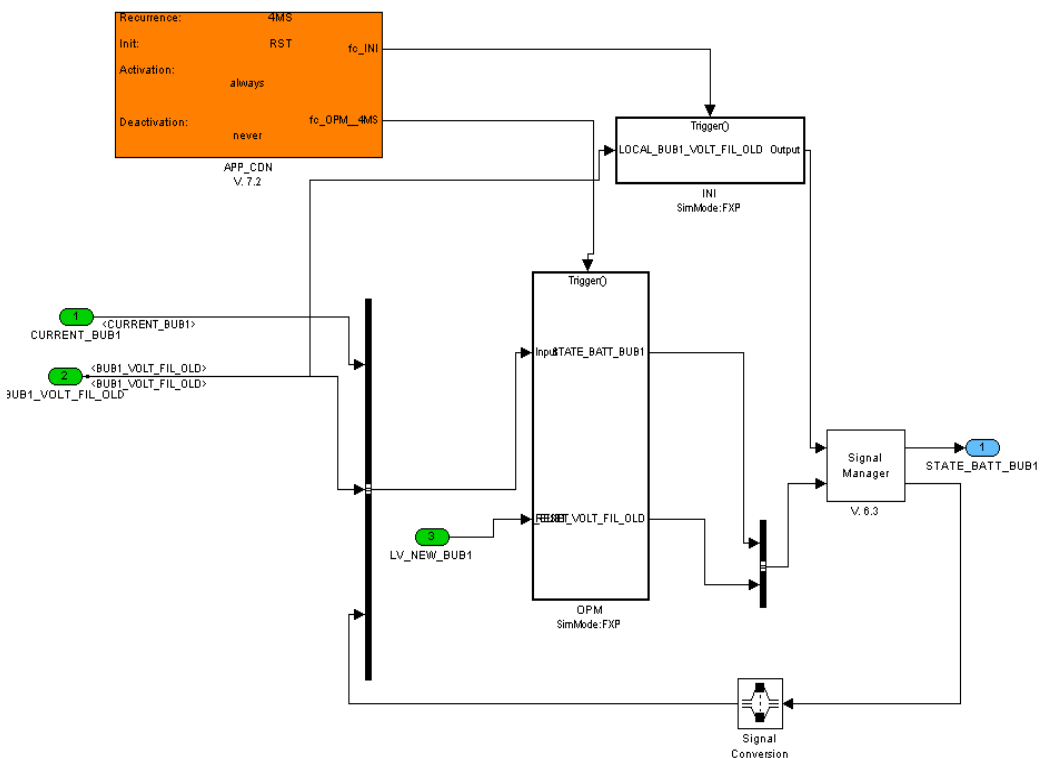


Fig. 3.15 Conținutul modulului STATUS1

3.3.2 Descrierea implementării funcțiilor algoritmului de diagnosticare

În continuare se vor prezenta pe rând modulele enumerate în paragraful anterior. În funcție de importanța rezultatelor calculate în interiorul funcțiilor și în concordanță cu cerințele de precizie, acestea s-au împărțit în două categorii: funcții care sunt implementate cu recurența de 2 [ms] sau cu recurența de 128 [ms]. Acest lucru s-a făcut ținând cont și de sistemul de operare al microcontrolerului și de celelalte aplicații care mai sunt implementate și sunt rulate de același microcontroler. Funcțiile care sunt apelate cu recurența de 2 [ms] sunt: AHCNT – funcția care calculează contorul amperi-oră și valoarea rezistenței interne a bateriei, funcțiile care sunt apelate cu recurența de 128 [ms] sunt: SOCDT – funcția care estimează starea de încărcare a bateriei, SOHCAP – funcția care estimează

capacitatea utilă maximă a bateriei în momentul în care se face proba de descărcare a bateriei și SOFBUB – funcția care estimează starea de funcționare a bateriei și decide dacă bateria este în stare să furnizeze energie electrică la parametri ceruți de aplicație. Pentru funcția care determină starea bateriei, STATUS, s-a decis ca aceasta să fie apelată cu recurența de 4 [ms].

A. Modulul STATUS

În interiorul acestui modul, pe baza semnalelor măsurate de la baterie (tensiune și curent), se decide dacă bateria este în proces de încărcare, de descărcare, în stare de tranziție – adică nu se încarcă, nu se descarcă, dar tensiunea de la bornele ei nu a atins valoarea din starea de echilibru, sau în stare de echilibru [3.1]. Aceste stări sunt determinate cu ajutorul următoarei mașini de stări, implementate în Matlab/Simulink, prezentată în **Fig. 3.16**. Stările sunt denumite: Equilibrium State, Charge State, Discharge State, Transitional State.

Dacă valoarea absolută a curentului bateriei este mai mică sau egală cu o valoare prestabilită, notată C_I_MIN și valoarea absolută a gradientului tensiunii de la bornele bateriei este mai mică decât o valoare prestabilită $C_U_DERIV_MIN$, atunci bateria este în stare de echilibru. Acest fapt este transmis celorlalte module prin intermediul variabilei de stare STATE_BAT_BUB care ia valoarea corespunzătoare stării de echilibru (Equilibrium State).

Dacă valoarea curentului bateriei este mai mică decât o valoare de prag notată $C_I_MIN_NEG$, atunci bateria se află în timpul procesului de descărcare iar acest lucru este semnalat în exteriorul modulului prin intermediul aceleiași variabile de stare, care în acest caz ia valoarea corespunzătoare stării de descărcare (Discharge State).

Dacă valoarea curentului bateriei este mai mare decât o valoare de prag notată C_I_MIN , atunci bateria se află în timpul procesului de încărcare iar acest lucru este semnalat celorlalte module prin intermediul variabilei de stare care ia valoarea corespunzătoare stării de încărcare (Charge State).

Dacă valoarea absolută a curentului măsurat al bateriei este sub valoarea de prag notată C_I_MIN dar valoarea absolută a gradientului de tensiune la bornele bateriei este mai mare decât o valoare de prag prestabilită $C_U_DERIV_MIN$, atunci înseamnă că bateria nu se încarcă, nu se descarcă, dar tensiunea la bornele ei nu a atins valoarea corespunzătoare stării de echilibru. Acest fapt corespunde stării de tranziție a bateriei, deci variabila de stare va lua valoarea corespunzătoare stării de tranziție (Transitional State). Valoarea variabilei de stare este transmisă celorlalte module pentru că în funcție de valoarea acesteia, modulele se vor ști ce calcule să efectueze. Conținutul modulului STATUS este prezentat în **Fig. 3.15**.

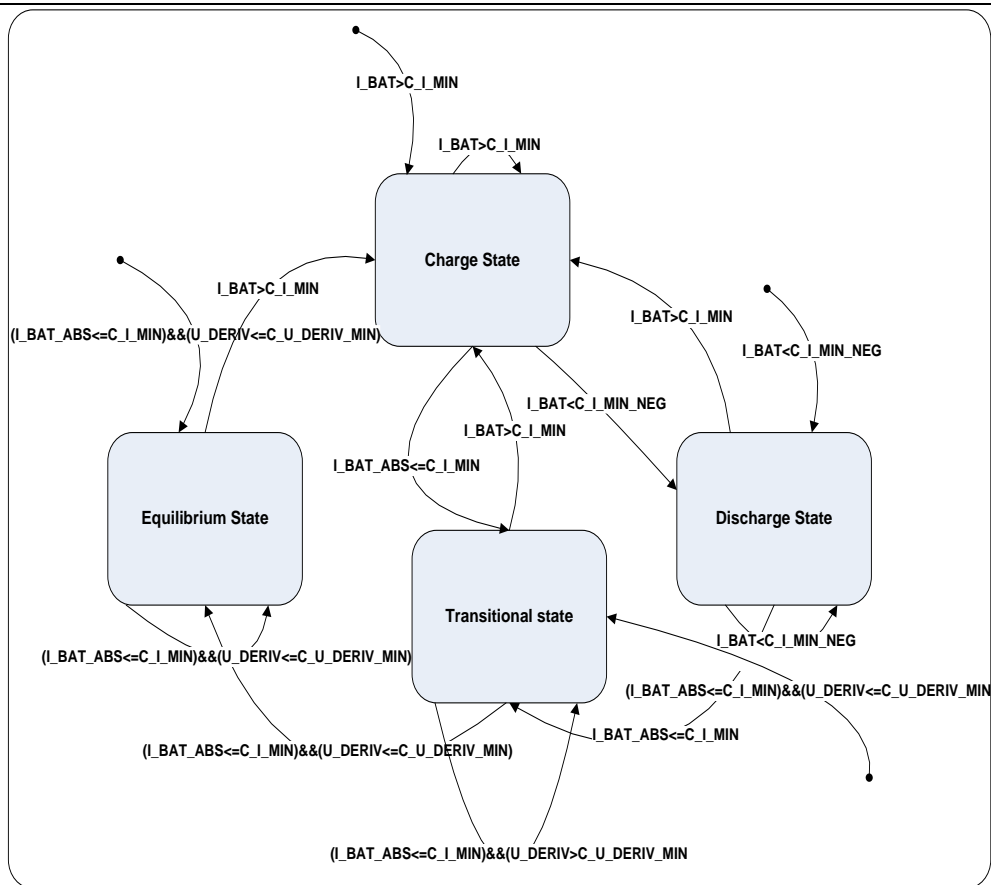


Fig. 3.16 Mașină de stări pentru determinarea stării actuale a bateriei

B. Modulul AHCNT

În interiorul acestui modul este calculat contorul amperi-oră, adică se integrează în timp valoarea măsurată a curentului bateriei. Rezultatul acestei integrări în timp a curentului se va folosi în interiorul altor module, la determinarea stării de încărcare a bateriei atunci când aceasta nu se găsește în stare de echilibru și a capacității maxime a bateriei. De fiecare dată când variabila de stare a bateriei ia valoarea corespunzătoare stării de echilibru, valoarea acestui contor se va aduce la 0 (se va reseta). Acest lucru este important pentru precizia rezultatelor obținute în urma calculelor, integrarea în timp a curentului bateriei implică și integrarea erorilor de măsurare a acestui semnal.

De asemenea, algoritmul acestei funcții trebuie să sesizeze momentul în care din baterie este descărcat un curent mai mare decât o valoare de prag prescrisă. Recurența acestei funcții este de 2 [ms], algoritmul va supraveghea valoarea semnalului de curent și când diferența dintre valoarea momentană actuală a curentului de descărcare și valoarea de la momentul anterior este în valoare absolută mai mare decât o valoare de prag prescrisă, înseamnă că avem un curent de descărcare suficient de mare pentru a calcula rezistența internă a bateriei. După cum s-a precizat și în paragraful 3.2.2, punctul A., este foarte important momentul de timp de după sesizarea acestui curent de descărcare când se citesc simultan

78 Metode de diagnosticare pentru bateriile de tip Li-ion - 3.

valorile tensiunii bateriei și curentului de descărcare. Un contor de timp va porni în momentul în care este sesizat curentul de descărcare și când acesta ajunge la o valoare de timp prescrisă, acesta va chema subrutina care realizează calculul rezistenței interne a bateriei cu relația (3.3). Această valoare a rezistenței interne obținută corespunde temperaturii de la momentul la care această descărcare a avut loc. Toate calculele efectuate pentru determinarea rezistenței interne a bateriei trebuie să se facă cu valori ale tensiunii bateriei și ale curentului prin baterie măsurate după același interval de timp trecut de la sesizarea curentului de descărcare al bateriei. Conținutul modulului AHCNT este prezentat în **Fig. 3.17**:

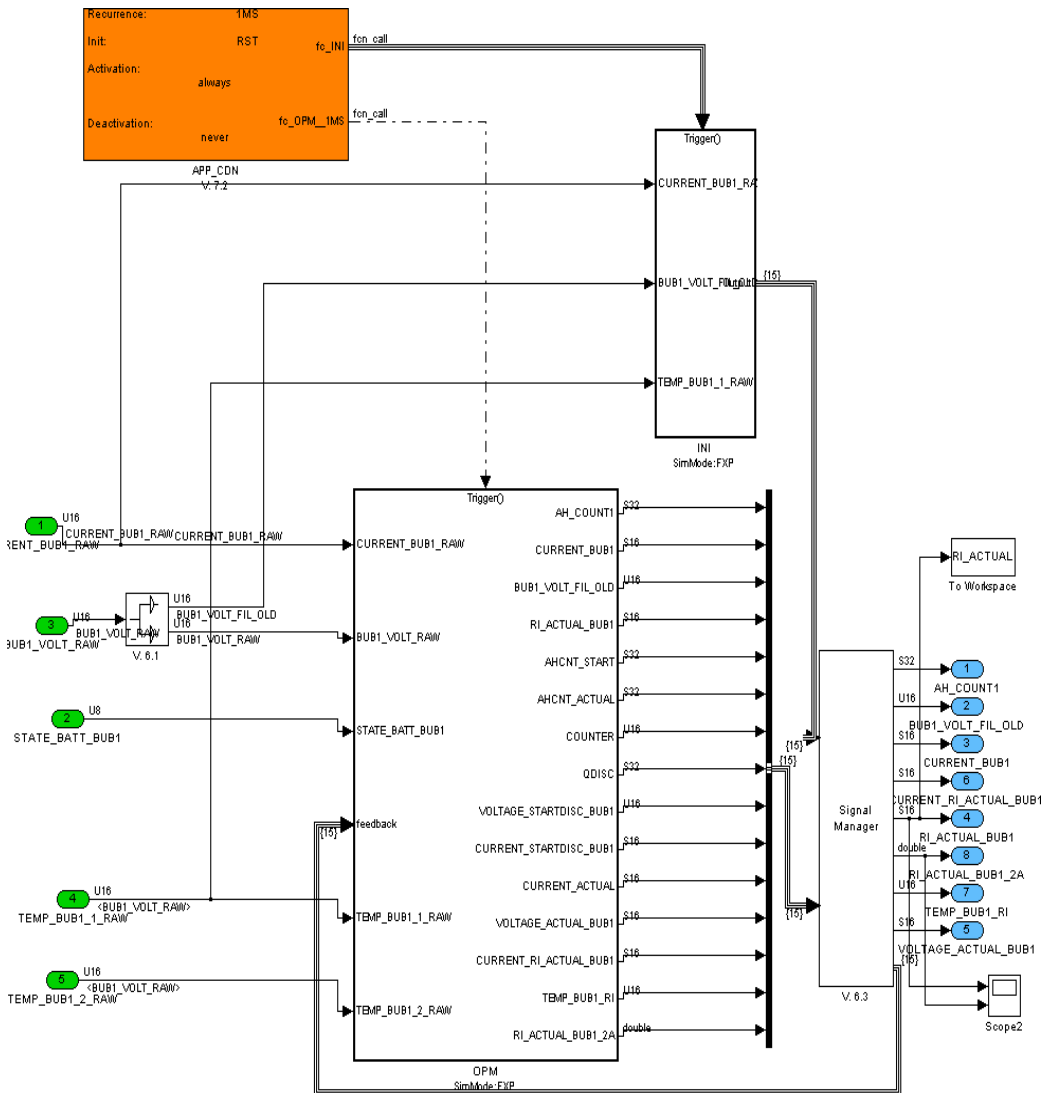


Fig. 3.17 Modulul AHCNT

C. Modulul SOHCAP

Acest modul calculează valoarea utilă maximă a capacității bateriei. După cum s-a precizat și în paragraful 3.2.2, punctul B, determinarea acestui parametru al bateriei se face cu ajutorul unei probe de descărcare a bateriei cu un curent de descărcare de 2[A] timp de 20 de minute. Aproximativ 25% din capacitatea bateriei este descărcată folosind această metodă. Această descărcare se face o dată la două luni, dacă sunt îndeplinite anumite condiții suplimentare: starea de încărcare a bateriei care urmează să fie supusă testului trebuie să fie cel puțin egală cu 80%, trebuie să ne asigurăm că o singură baterie este descărcată în acest timp, temperatura bateriei nu trebuie să depășească 50⁰C și să fie mai mare de 10⁰C, toate condițiile care arată starea de funcționare a bateriei trebuie să fie îndeplinite. Conținutul modulului SOHCAP este prezentat în **Fig. 3.18**:

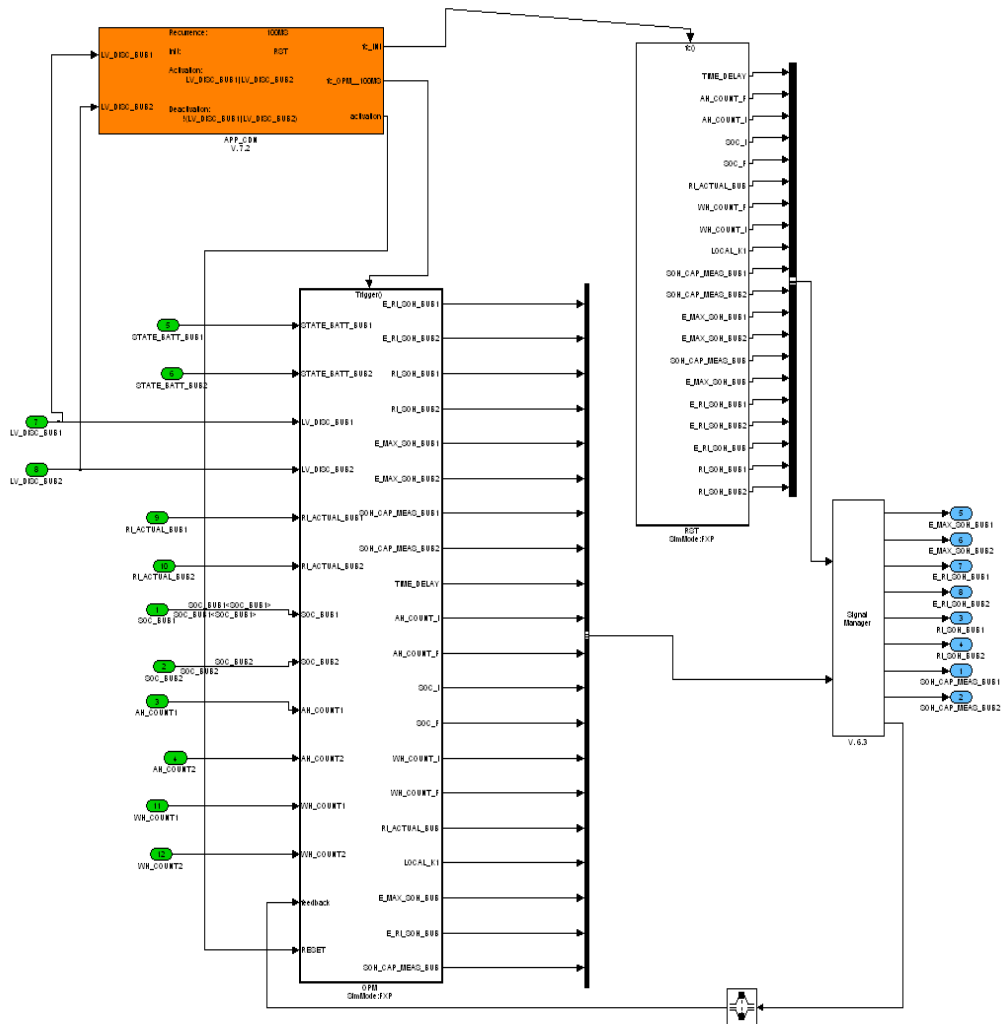


Fig. 3.18 Modulul SOHCAP

D. Modulul SOCDT

Acest modul calculează valoarea procentuală a stării de încărcare a bateriei. În funcție de valoarea variabilei de stare a bateriei, care este semnal de intrare în acest modul, algoritmul acestei funcții estimează starea de încărcare a bateriei. Dacă bateria este în stare de echilibru, atunci pe baza valorii măsurate a tensiunii la bornele acesteia (tensiunea de circuit deschis) se determină, din tabelul cu valori fixe salvat în memoria microcontrolerului, valoarea stării de încărcare corespunzătoare acestei valori măsurate. Pentru valorile de tensiune care se situează între valorile fixe din tabel, se aplică interpolarea liniară pentru determinarea valorii corespunzătoare a stării de încărcare.

Dacă bateria nu este în stare de echilibru atunci se vor folosi valorile variabilelor calculate în modulele AHCNT – pentru valoarea contorului de sarcină și SOHCAP pentru valoarea capacității maxime actuale a bateriei. Starea de încărcare se determină pentru fiecare dintre celulele care alcătuiesc bateria. Se verifică starea de încărcare a fiecărei celule și aceste valori nu trebuie să difere cu mai mult de 5% între ele. Pentru determinarea valorii stării de încărcare a bateriei se calculează media stărilor de încărcare ale celulelor, dacă aceste valori îndeplinesc condiția de omogenitate. Dacă această condiție nu e îndeplinită, atunci se consideră valoarea stării de încărcare de la momentul de timp anterior. Această funcție este apelată la 128[ms]. Conținutul modulului SOCDT este prezentat în **Fig. 3.19:**

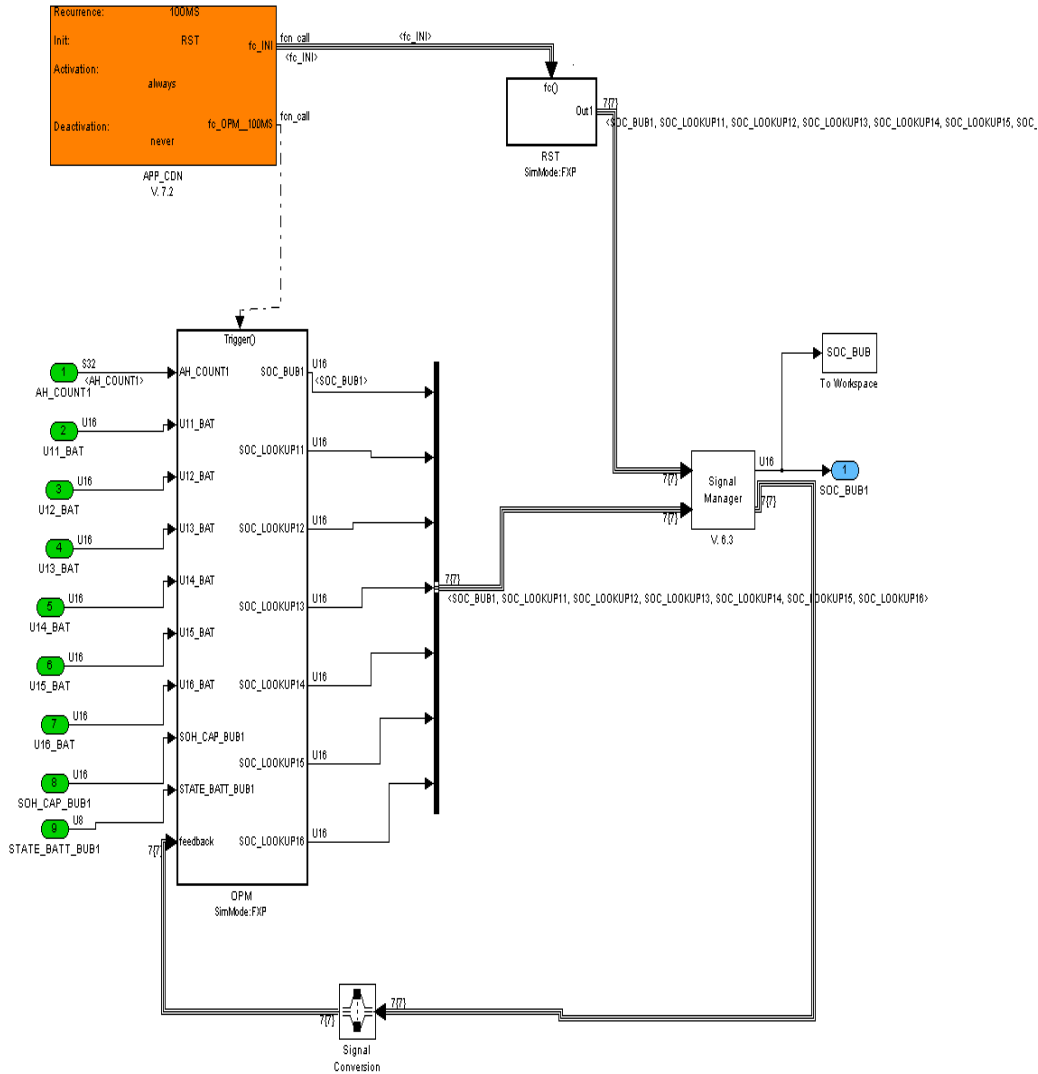


Fig. 3.19 Modulul SOCDET

E. Modulul SOFBUB

În interiorul acestui modul se fac verificările condițiilor precizate în paragraful 3.2.3. Semnalele de intrare în acest modul sunt: rezistența internă a bateriei, starea de încărcare a bateriei, capacitatea maximă și temperatura de la suprafața bateriei. În funcție de aceste date algoritmul acestei funcții decide dacă bateria este în stare să furnizeze energie electrică la parametri necesari acționării în bune condiții a sistemului de frânare al autovehiculului.

Valoarea pentru rezistența maximă admisibilă la temperatura de -10^0 C este o valoare care se calculează pentru fiecare tip de sistem care echează autovehiculul. Pentru acest calcul se consideră relația (3.5), cu valori pentru tensiunea minimă necesară acționării sistemului de frânare notată cu $U_{minim_necesar_aplicatie}$ și are

82 Metode de diagnosticare pentru bateriile de tip Li-ion - 3.

valoarea de 10[V]. Tensiunea maximă a bateriei este $U_{max_bat} = 6 * 4,08 = 24,48$ [V] – se consideră bateria complet încărcată, valoarea tensiunii fiecărei celule fiind 4,08 [V]. Valoarea curentului maxim cerut de aplicație I_{max} este de 23 [A]. Cu aceste date valoarea lui $R_{max}(-10^0)$ este 630 [mΩ]. Această valoare este înmulțită cu valoarea coeficientului de temperatură $K(\theta)$ – subunitar - care se citește din tabelul de valori fixe – vezi **Fig. 3.8** - în funcție de valoarea temperaturii la suprafața bateriei. Astfel se obține valoarea maxim admisibilă pentru rezistența internă a bateriei la temperatura actuală.

Starea de funcționare a bateriei este un semnal de ieșire de tip logic: poate lua valoarea 0 sau 1. Dacă ieșirea are valoarea logică 1 înseamnă că bateria este capabilă să furnizeze energie electrică la parametrii necesari acționării corecte a frânei, dacă ieșirea are valoarea logică 0 bateria nu este capabilă să furnizeze energie electrică la parametrii necesari frânării. În acest caz se va activa dispozitivul pentru alertarea șoferului și bateria va trebui schimbată. Conținutul modului SOFBUB este prezentat în **Fig. 3.20**:

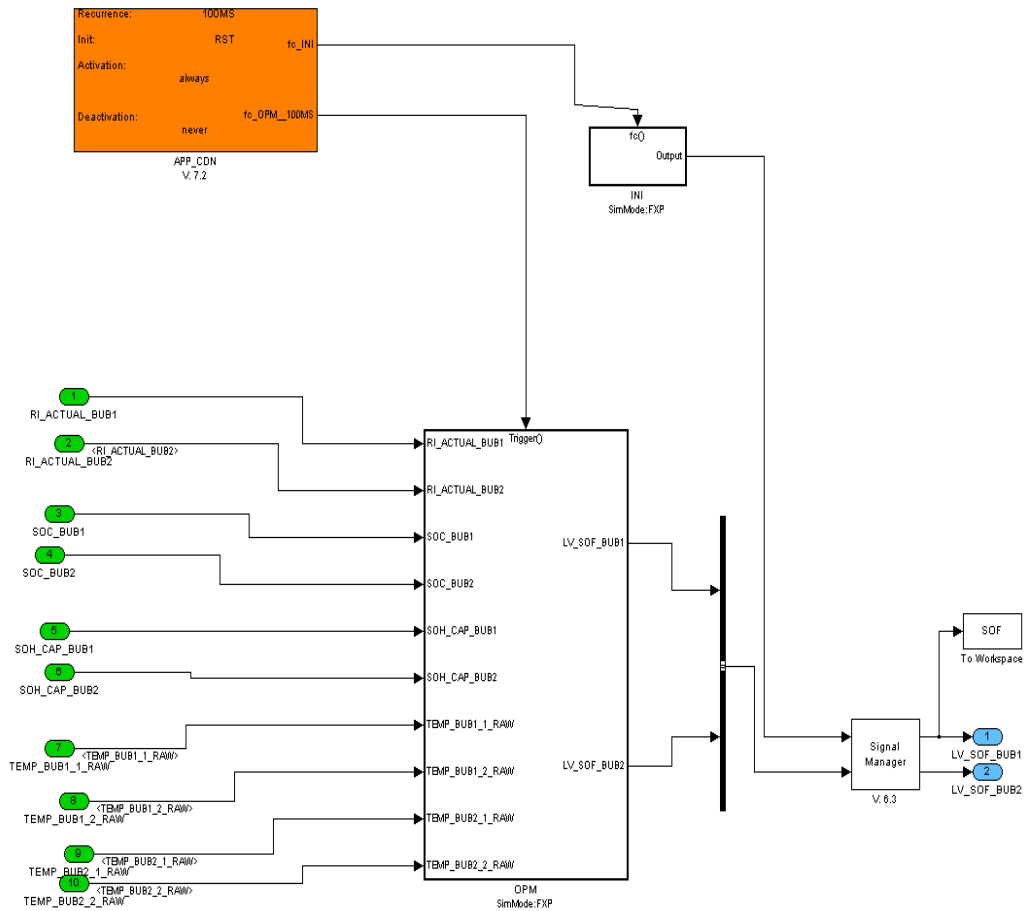


Fig. 3.20 Modulul SOFBUB

3.4 Algoritm de management al bateriilor

Algoritm de diagnosticare a bateriilor prezentat în paragraful 3.2 face parte dintr-un algoritm mai vast care se referă la managementul bateriilor, adică la exploatarea acestor baterii în concordanță cu recomandările producătorului în scopul obținerii performanțelor maxime și pentru o durată de viață cât mai mare a acestora.

Exploatarea optimă a acestor baterii implică modul de încărcare a acestora, echilibrarea celulelor care alcătuiesc fiecare baterie, modul de descărcare și încălzirea acestora, dacă este cazul, pentru a le aduce în interiorul plajei de valori de temperatură specificate de către producător (temperatura minimă de operare pentru aceste tipuri de baterii este -20°C). Având în vedere că fiecare baterie este alcătuită din 6 celule legate în conexiune serie, tensiunea bateriei este suma tensiunilor fiecărei celule. În timpul exploatării bateriilor trebuie să ne asigurăm că celulele din care sunt alcătuite bateriile sunt exploatate uniform, adică toate se află la aceeași stare de încărcare, controlabilă prin măsurarea tensiunii fiecărei celule. Dacă există un neechilibru între celulele unei baterii datorat unei imperfecțiuni a contactelor sau legăturilor electrice sau a datorat unei distribuții de temperatură neuniforme în întreg pachetul de celule care alcătuiesc bateria, atunci unele pot suferi o îmbătrânire accelerată, tot mai pronunțată în timp, în final ducând la deteriorarea acelor celule și implicit la deteriorarea întregii baterii, aceasta trebuind să fie schimbată.

Modulele (funcțiile) care fac parte din algoritmul de management al bateriilor sunt:

- CHARGE – modulul care comandă și supraveghează procesul de încărcare al bateriei;
- DISCHARGE – modulul care comandă și supraveghează procesul de descărcare al bateriei;
- CELLBALANCE – modulul care asigură măsurarea și echilibrarea tensiunii celulelor care alcătuiesc o baterie și stabilește ordinea în care se măsoară aceste celule;
- HEATBUB – modulul care asigură comanda dispozitivelor care realizează încălzirea bateriei până la temperatura optimă de operare;

Schema bloc a întregului algoritm de management al bateriei este prezentată în **Fig. 3.21**. Blocurile de culoare mai deschisă aparțin algoritmului de diagnosticare a bateriei, cele de culoare mai închisă sunt în legătură strânsă cu bateria și dispozitivele auxiliare ale bateriei, supraveghează și comandă exploatarea eficientă a bateriei.

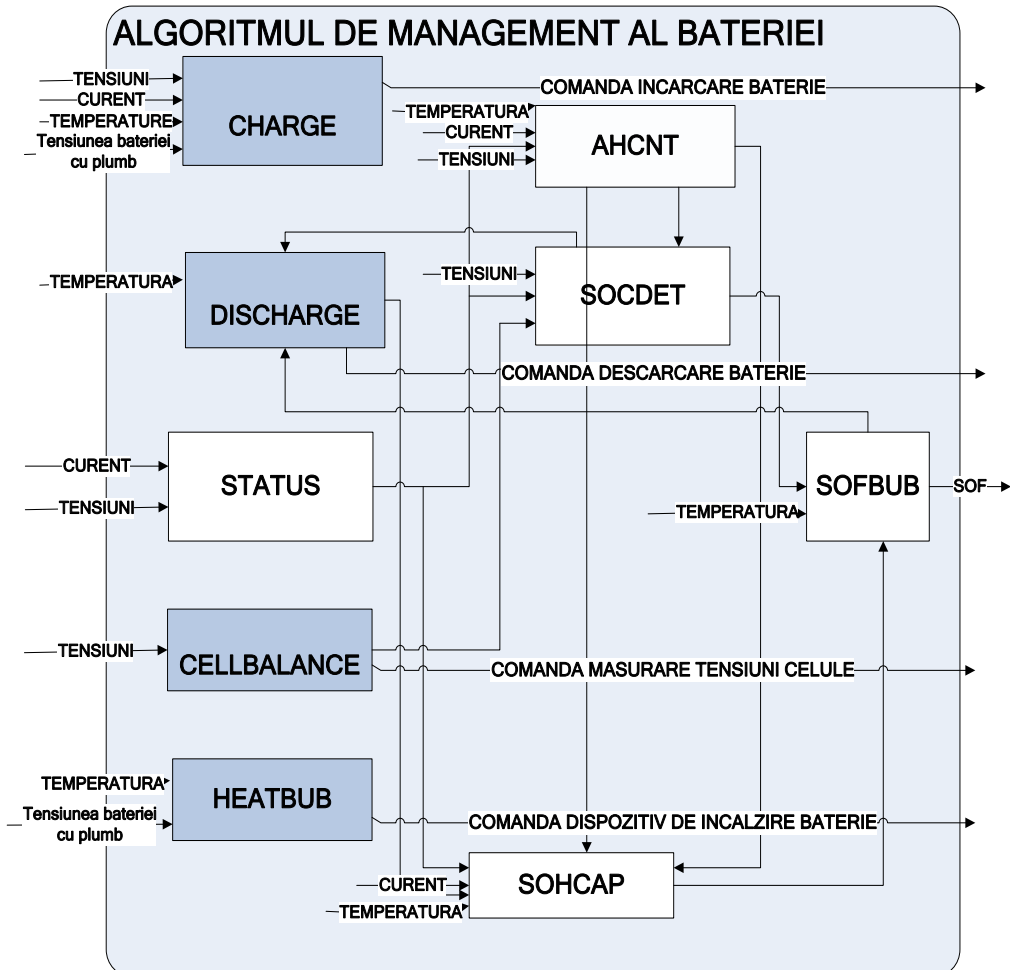


Fig. 3.21 Schema bloc a algoritmului de management al bateriei [3.8]

A. Modulul CHARGE

Modulul CHARGE supraveghează procesul de încărcare a bateriilor. Această funcție supraveghează valorile tensiunilor fiecărei celule și atunci când cel puțin una are tensiunea sub o valoare de prag prestabilită, se comandă începerea procesului de încărcare a întregii baterii. Bateriile de tip Li-ion se încarcă într-un mod special, curentul lor de încărcare nu trebuie să depășească valoarea maximă specificată de producător. În cazul celulelor de tip Sony 26650 această valoare este de 5[A]. În cadrul acestui proiect valoarea maximă a curentului de încărcare a fost limitată la 2[A]. De asemenea, tensiunea maximă de încărcare a fost stabilită la 4.1[V]. Încărcări ale celulelor peste această limită ducând la îmbătrânirea accelerată a celulelor și în unele cazuri pot fi periculoase, uneori putând genera aprinderea celulelor și compromiterea întregului ansamblu. Supravegherea procesului de încărcare este o funcție foarte importantă pentru exploatarea sigură a ansamblului de celule. Procesul de încărcare este de tipul curent constant – în prima fază, până când se atinge valoarea tensiunii maxime prescrise, apoi tensiune constantă,

curentul scăzând treptat până la atingerea valorii la care se consideră că bateria este complet încărcată. Pentru aceste celule s-a stabilit un curent minim de încărcare de 50[mA].

Bateriile de rezervă de tip Li-ion se încarcă de la bateria principală a mașinii, cea cu plumb. Din această cauză trebuie supravegheat și nivelul tensiunii bateriei cu plumb. Dacă acesta nu este la o valoare care permite încărcarea bateriilor secundare, procesul de încărcare nu poate avea loc.

Acest modul setează semnale de eroare și întrerupe procesul de încărcare atunci când nu există concordanța între comandă, tensiunea celulelor și curentul măsurat.

B. Modulul DISCHARGE

Acest modul comandă și supraveghează procesul de descărcare a bateriei atunci când se face proba de descărcare pentru determinarea capacității maxime a bateriei. Descărcarea bateriei în acest scop se face la intervale de timp bine precizate și în anumite condiții care țin cont de temperatură și de starea bateriei. În interiorul modului există un contor de timp care măsoară timpul între două probe de descărcare. Când contorul a ajuns la valoarea prescrisă se verifică și celelalte condiții care trebuie îndeplinite: temperatura trebuie să fie în intervalul $+10^{\circ}\text{C}$ - $+50^{\circ}\text{C}$, starea de încărcare a bateriei trebuie să fie cel puțin 80%, starea de funcționare a ei trebuie să corespundă cerințelor aplicației (vezi paragraful 3.3.1, punctul E).

Când toate aceste condiții sunt îndeplinite modulul comandă descărcarea bateriei și de asemenea acest modul supraveghează acest proces de descărcare. Dacă valorile tensiunilor și curentului nu sunt corelate, atunci se setează semnal de eroare la descărcare și de asemenea se întrerupe procesul.

C. Modulul CELLBALANCE

Acest modul supraveghează permanent valoarea tensiunilor celulelor și de asemenea stabilește ordinea în care sunt măsurate celulele care alcătuiesc o baterie. Procedura de măsurare se bazează pe încărcarea unui condensator la tensiunea celulei măsurate. Apoi acest condensator se conectează la intrarea ADC-ului care va furniza algoritmului valoarea numerică a tensiunii celulei.

Celulele unei baterii sunt măsurate pe rând, una după cealaltă. Ideea care stă la baza stabilirii succesiunii celulelor este aceea că prima dată se măsoară celula care la secvența de măsurare anterioară a avut tensiunea cea mai mare, apoi imediat se măsoară celula care a avut tensiunea cea mai mică, apoi următoarea care a avut tensiunea mare și tot așa până se măsoară toate cele 6 celule ale bateriei. Prin acest procedeu se obține egalizarea tensiunilor celulelor cu ajutorul condensatorului care se mută de pe o celulă pe alta. Pentru prima secvență de măsurare se pornește de la o ordine aleatoare a celulelor, apoi pe baza tensiunilor măsurate se stabilește ordinea de la următoarea secvență de măsurare.

D. Modulul HEATBUB

Acest modul comandă și supraveghează alimentarea dispozitivelor de încălzire a bateriei pentru a aduce temperatura acesteia la o valoare apropiată de valoarea necesară funcționării optime a bateriei. Dispozitivele de încălzire sunt sub forma unor folii încălzitoare care îmbracă suprafața laterală a bateriei. Acestea sunt alimentate la 12[V] de la bateria cu plumb a autovehiculului. Temperatura de la suprafața bateriei este supravegheată pentru ca aceasta să nu depășească 60°C . O temperatură mai mare la suprafața bateriei poate duce la deteriorarea acesteia sau chiar la situații periculoase. Alimentarea dispozitivelor de încălzire se poate face doar dacă nivelul de tensiune al bateriei cu plumb este peste o anumită valoare.

Dezvoltarea algoritmului de diagnosticare a bateriei utilizând programul Matlab/Simulink cu mediul SDA a respectat următoarele etape:

1. Conceperea algoritmului de diagnosticare pe baza considerațiilor teoretice prezentate în capitolul 3 și rularea acestuia cu valori numere reale atât pentru semnalele de intrare cât și pentru cele interne și de ieșire.

2. După ce s-a verificat corectitudinea algoritmului, a ordinii de apelare a funcțiilor, etc., s-a făcut transferul operațiilor la numere întregi. În acest scop toate semnalele au fost definite având un nume și un tip de date bine precizat, fiecare având limite de valori numerice bine precizate – date de tipul definit de dată - și limite fizice minime și maxime – date de natura semnalului (curent, tensiune, temperatură) și de limitele minime și maxime reale pe care le pot lua aceste semnale. În funcție de aceste valori s-au calculat factorii de scalare pentru toate semnalele de intrare și de ieșire și mărimile intermediare de calcul. Simularea algoritmului utilizând numai valori întregi ale semnalelor și mărimilor intermediare este o etapă foarte laborioasă și importantă în elaborarea și definitivarea algoritmului folosit. Ordinea de execuție a calculelor, mărimea tipului de date (cu semn sau fără semn) și de asemenea optimizarea folosirii memoriei microcontrolerului sunt factori importanți de care trebuie ținut cont în această etapă. Rezultatele obținute prin simularea cu valori întregi sunt datele și valorile pe care le va calcula și microcontrolerul care va rula acest algoritm. De asemenea, în această etapă trebuie să ne asigurăm că în nici o situație și pentru nici o mărime nu se vor depăși valorile numerice declarate ale variabilelor și ale semnalelor (overflow).

3. După ce toate testele s-au făcut și rezultatele au fost cele așteptate, se trece la generarea de cod din fiecare modul, codul C rezultat pentru algoritmul de diagnosticare trebuind mai apoi integrat cu celelalte programe care rulează pe microcontroler (drivere și aplicații).

3.5 Concluzii

În acest capitol este prezentat un concept unitar pentru algoritmul de diagnosticare în timp real a bateriilor de tip Li-ion. Pornind de la reglementările legale în vigoare referitoare la sistemele de frânare ale automobilelor și de la particularitățile aplicației de frână electrică, se stabilesc necesitățile de putere și de energie pe care trebuie să le satisfacă un sistem de rezervă pentru stocarea energiei electrice. Curba de variație a curentului de descărcare în timpul unui ciclu de frânare este un element esențial în stabilirea cerințelor pe care trebuie să la îndeplinească aceste sisteme. De asemenea, se stabilesc care sunt parametrii bateriei cei mai relevanți pentru a evidenția atât starea momentană a acesteia, cât și punctul în care a ajuns aceasta în ciclul ei de viață. Metodele de calcul a acestor parametri sunt astfel alese ca să poată fi aplicate pentru calculul în timp real.

Este prezentat de asemenea modul de structurare al întregului algoritm de diagnosticare și este explicată implementarea acestuia cu ajutorul programului Matlab/Simulink împreună cu mediul SDA. Întregul algoritm s-a împărțit în module (sau funcții), execuția calculelor făcându-se în interiorul acestor funcții având recurența bine precizată (task-uri). Mediul SDA (System Design Automation) este un mediu care oferă un fel de "sistem de operare", este imaginea funcțională a sistemului de operare al microcontrolerului. Acest SDA a fost conceput pentru ca încă de la începutul modelării/simulării algoritmului să fie gândiți ținând cont de faptul că în final aceștia vor rula pe un microcontroler. Caracteristica de bază a modelării utilizând mediul SDA o constituie posibilitatea unei complete ordonări a informației și

un control complet al ordinii de execuție a calculelor. Tot în acest capitol este prezentat algoritmul complet de management în timp real a bateriilor Li-ion, algoritmul din care face parte și algoritmul de diagnosticare.

3.6 Bibliografie

- [3.1] Bergveld H J, Kruijt W S and Notten P H L 2002 *Battery Management Systems, Design by Modelling (Philips Research Book Series)* vol 1 (Boston, MA: Kluwer);
- [3.2] ECE – R 13H, Regulation No.13, *Uniform Provisions Concerning the Approval of Passenger Cars With Regard to Braking*, (2007).
- [3.3] The Electronic Wedge Brake Compendium, 2007;
- [3.4] D.Linden, T.B.Reddy, *Handbook of Batteries*, third edition, McGraw-Hill, 2002;
- [3.5] *Lithium Ion Rechargeable Battery Technical Information*, Sony Corporation MSNC Energy Company, October 2006;
- [3.6] Department of Energy (DOE) Office of Basic Energy Sciences Workshop *Technology and Applied R&D Needs for Electrical Energy Storage*, March 2007;
- [3.7] Trăistaru A., Andree D., Avram I., *Diagnosis of Li-ion Batteries Used for Power Application in the Automotive Industry*, Proceedings of the 8th European Symposium on Electrochemical Engineering, pp. 194–208, Prague 2008;
- [3.8] Trăistaru A., Andree D., Avram I, *Li-ion Battery Management Concept for Dry-by-wire Systems*, International Automotive Electronics Congress, Paris 2008;
- [3.9] Trăistaru A., Șora I., *Aspects Concerning Real Time Determination of Li-ion Battery State of Charge and Other Parameters*, Scientific Bulletin of the "Politehnica" University of Timisoara, Romania, Transactions on Power Engineering, Proceedings of the 11th Timisoara Academic Days Conference, May 28-29, 2009, Timisoara, Romania;

4 Testarea algoritmului de diagnosticare și validarea experimentală a soluțiilor propuse

4.1 Schema și programele utilizate în scopul măsurării semnalelor de la baterie

Scopul acestui capitol este de a testa algoritmul de diagnosticare propus în capitolul 3. Ca date de intrare pentru modelul Matlab/Simulink prezentat anterior se folosesc semnalele măsurate de la celule: curentul, tensiunea și temperatura de la suprafață. Aparatele folosite pentru prescrierea diferitelor regimuri de funcționare și apoi pentru măsurarea *semnalelor externe* ale celulelor sunt:

- Sarcină electronică Agilent N3306A;
- Multimetru digital Agilent 34401A;
- Sursă de putere Konstanter SLP 240-40;
- Camera termică: Votsch VT 4002;
- Senzori de temperatură: modul de măsurare a temperaturii NI USB

9162 cu termocuple tip K;

- Placă de achiziții de date: National Instruments NI 6036E;

În **Fig. 4.1** este prezentată schema bloc a monajului care s-a folosit pentru comanda regimurilor de funcționare a bateriilor și achiziția datelor în timpul testelor de descărcare:

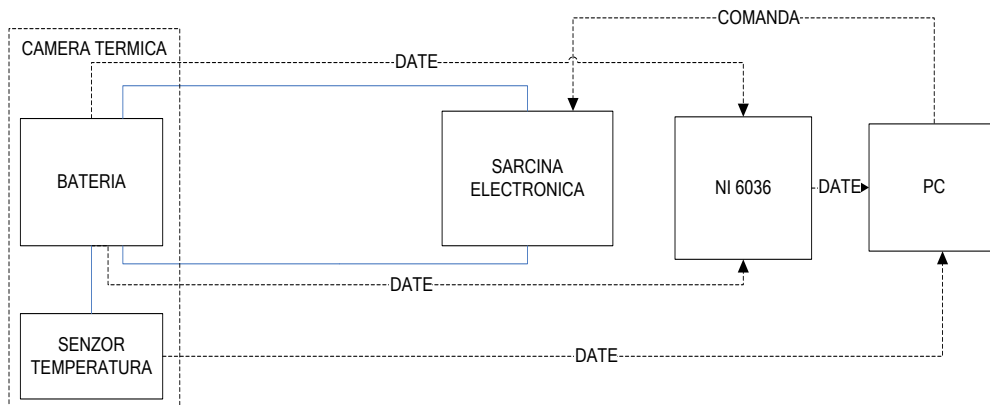


Fig. 4.1 Schema bloc a montajului pentru comanda regimului de funcționare al bateriilor și pentru măsurarea datelor de la baterie

Cu ajutorul programelor LabView se comandă sarcina electronică pentru diverse regimuri de funcționare. Aceasta poate funcționa în regim de curent constant, în regim de tensiune constantă sau în regim de rezistență constantă. Pentru testarea bateriilor s-a folosit regimul de curent constant. S-a descărcat

bateria fie cu curent constant, fie cu o succesiune de curenți constanți, corespunzător ciclului de frânare prezentat în **Fig. 3.5**.

Datele măsurate de la baterie: tensiune, curent și temperatură s-au salvat în fișiere text și acestea au fost importate în programul Matlab, ca date de intrare reale pentru algoritmul de diagnosticare. Trebuie avut în vedere faptul că testele și măsurătorile s-au făcut cu celule individuale SONY 26650. Algoritmul de management al utilizării bateriilor este conceput pentru baterii realizate din 6 celule conectate în serie, de aceea, ca date de intrare s-au folosit valorile de tensiune măsurate de la o celulă înmulțite cu 6. Pe de altă parte, algoritmul estimează rezistența internă a unei baterii, deci rezistența corespunzătoare pentru 6 celule conectate în serie. Pe baza datelor măsurate algoritmul calculează în timp real parametrii bateriei și decide dacă aceasta este capabilă să furnizeze energie la parametrii necesari pentru 5 cicluri de frânare, așa cum s-a precizat în capitolul anterior.

În principal s-au utilizat două tipuri de teste de descărcare: descărcare cu curenți de valoare mare pentru un interval scurt de timp (sute milisecunde) - pentru estimarea valorii rezistenței interne a bateriei și descărcare cu curent constant (2 [A]) pentru un timp prescris (10 minute, 20 minute) pentru estimarea capacității maxime utile a bateriei. Starea de încărcare a bateriei s-a estimat în ambele cazuri, nefiind necesare teste separate, suplimentare pentru determinarea acesteia. Testele s-au realizat la diferite temperaturi în intervalul -20°C - $+60^{\circ}\text{C}$ utilizând camera termică Votsch 4002. Pentru fiecare din cele două tipuri de teste s-au construit, cu ajutorul programului LabView, instrumentele virtuale necesare pentru comanda regimurilor de funcționare și achiziției semnalelor de la baterii. În ambele cazuri s-au măsurat: curentul bateriei, tensiunea bateriei și temperatura la suprafața acesteia. Pentru testele efectuate în scopul estimării rezistenței interne a bateriei achiziția semnalelor măsurate s-a făcut la fiecare milisecundă - pentru tensiune și curent. Pentru testele efectuate în scopul estimării capacității electrice maxime a bateriei, teste pentru care s-a prescris descărcarea bateriei pentru o perioadă mai lungă de timp (10 minute sau 20 minute), achiziția datelor s-a făcut la intervale de 400 milisecunde. Pentru semnalul de temperatură s-a considerat un interval de timp de 1 secundă pentru achiziția valorilor măsurate.

Diagramele bloc ale instrumentului virtual folosit pentru comanda sarcinii electrice și pentru măsurarea și achiziționarea datelor de la baterie în cazul testelor pentru estimarea rezistenței interne a bateriei sunt prezentate în **Fig. 4.2, 4.3, 4.4 și 4.5**. Schema de măsurare este concepută sub forma unei succesiuni de stări ("state machine") prin care trece programul de măsurare în funcție de comenzile care i se dau din exterior sau în funcție de temperatura la care este bateria (ex. nu se începe descărcarea acesteia dacă temperatura la suprafața nu este mai mare de -20°C). Stările prin care trece programul de măsurare sunt: "*temp*" - se măsoară temperatura de la suprafața bateriei înainte de începerea descărcării acesteia și se configurează sarcina electronică să lucreze în regim de curent - **Fig. 4.2**, "*meas*" - comanda descărcării bateriei cu ajutorul sarcinii electronice și achiziția de date în timpul descărcării bateriei - **Fig. 4.3**, "*temp2*" - măsurarea temperaturii după terminarea descărcării - **Fig. 4.4**. În **Fig. 4.5** este prezentat instrumentul virtual folosit pentru măsurarea și achiziția datelor de temperatură prin citirea semnalelor de la termocuple. În **Fig. 4.6** este prezentat panoul de control al instrumentului virtual. Datele măsurate se salvează în fișiere text care vor fi mai apoi utilizate ca date de intrare pentru algoritmul de diagnosticare.

90 Testarea algoritmului de diagnosticare și validarea experimentală – 4.

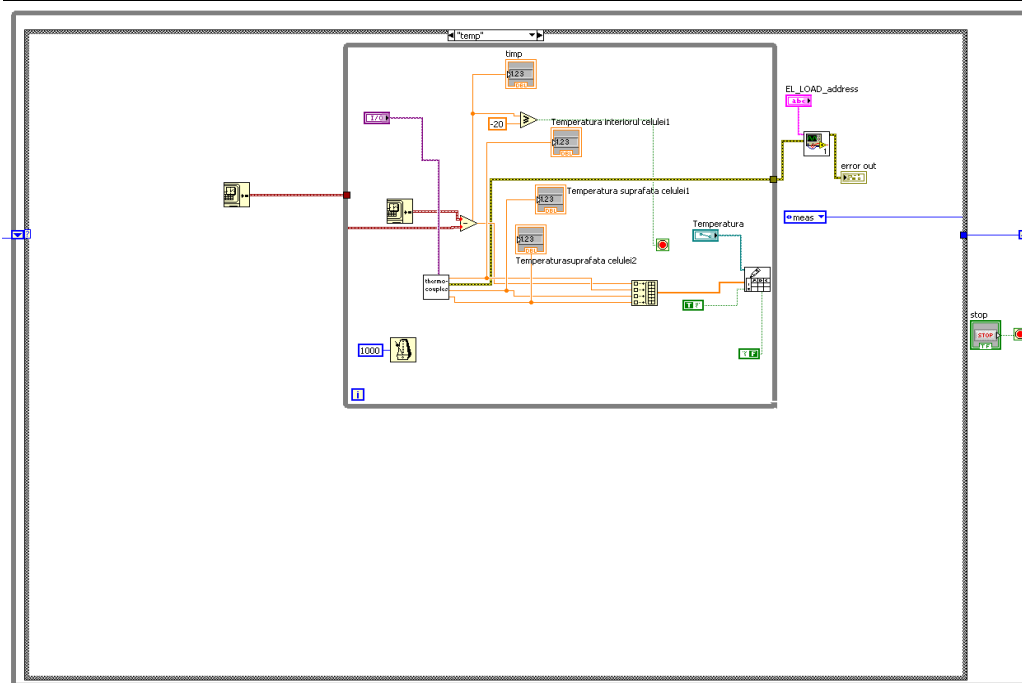


Fig. 4.2 Diagrama bloc IV în starea "temp"

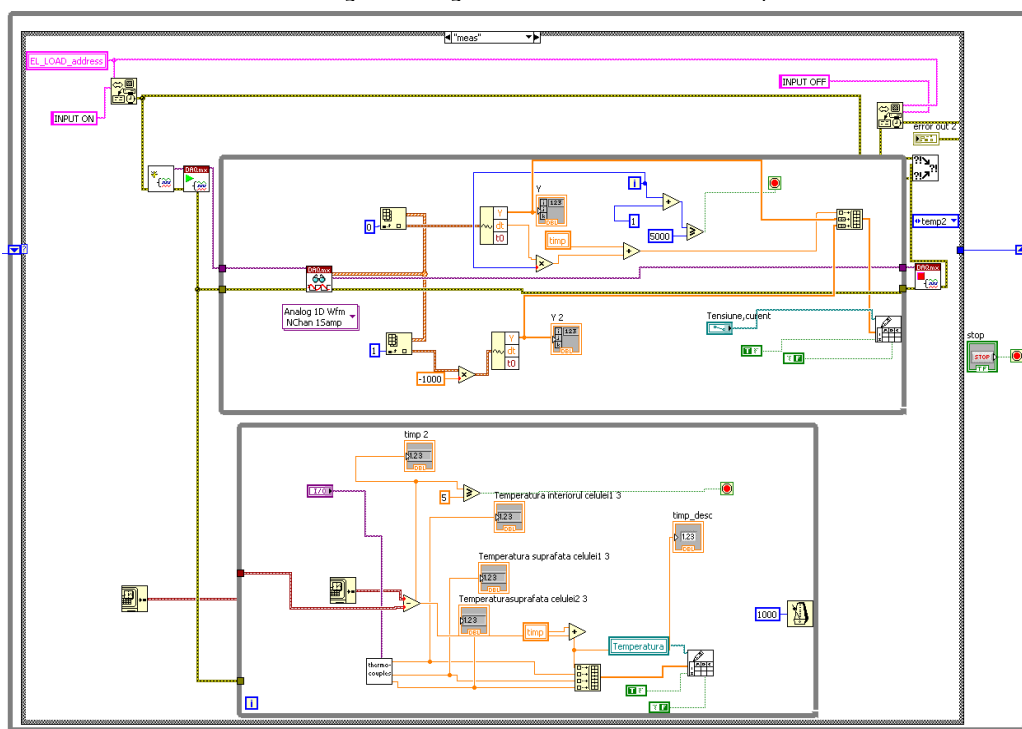


Fig. 4.3 Diagrama bloc a IV în starea "meas"

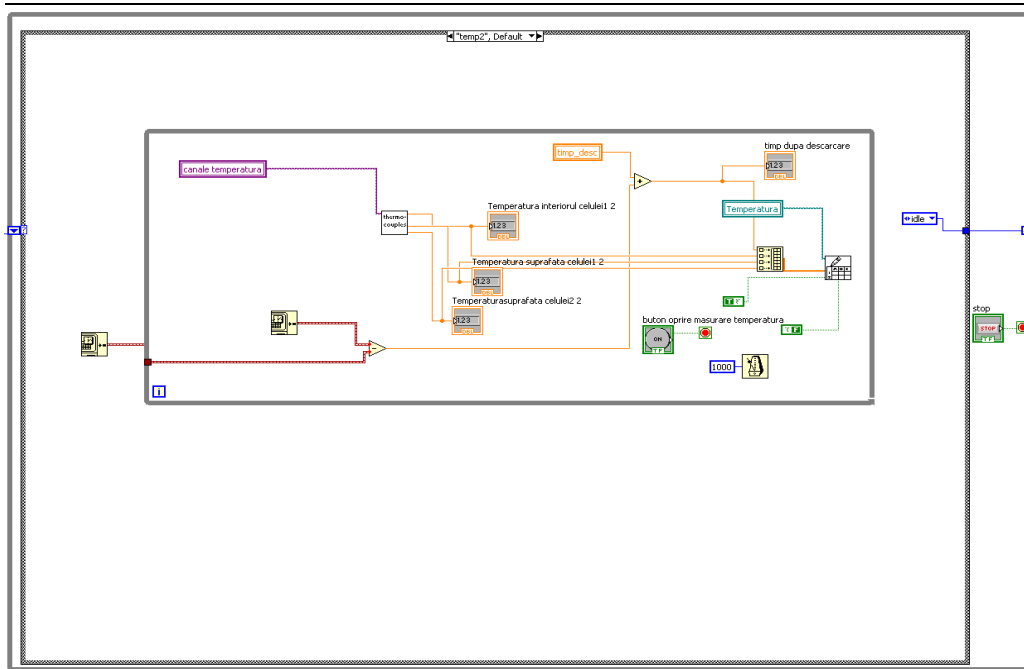


Fig. 4.4 Diagrama bloc a IV în starea "temp2"

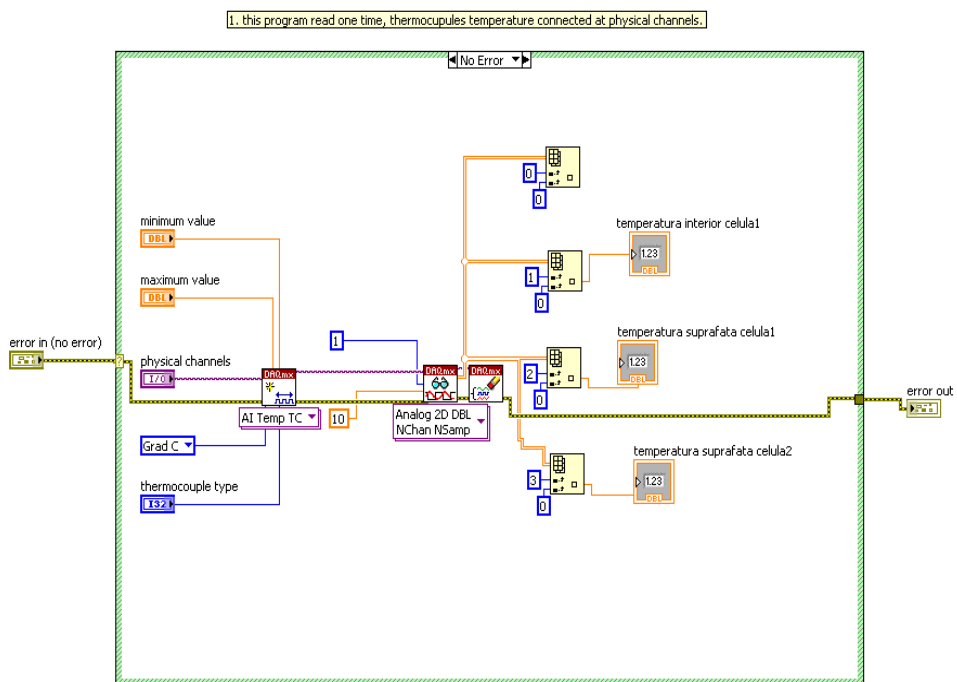


Fig. 4.5 Diagrama bloc a IV utilizat pentru măsurarea temperaturii

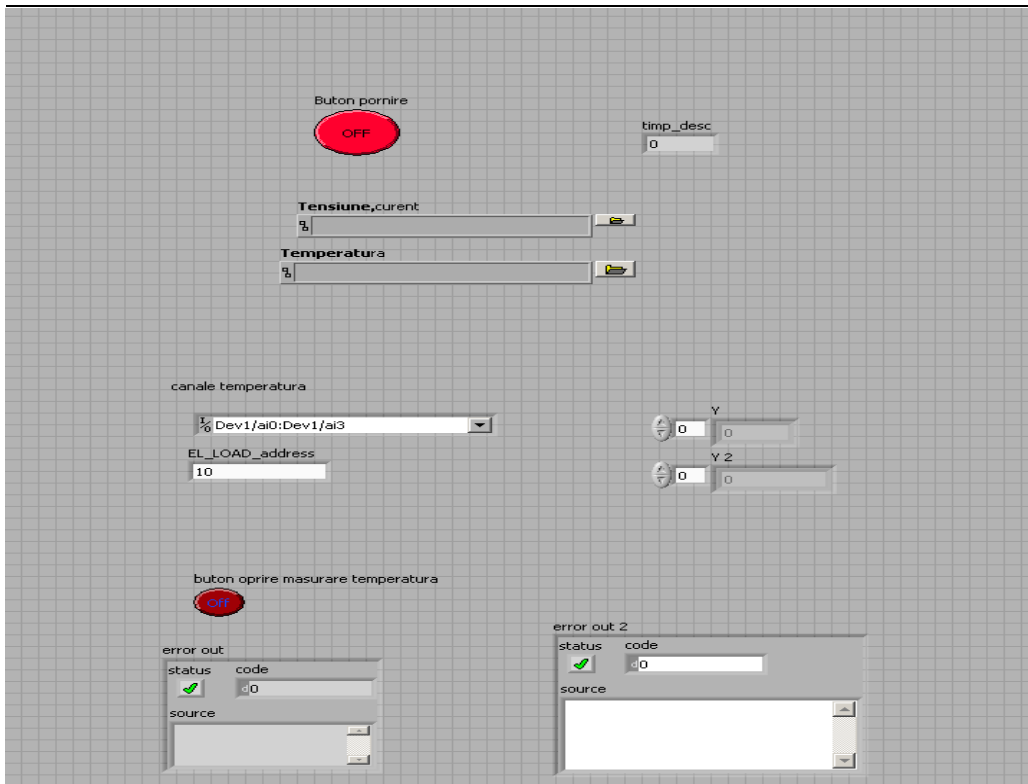


Fig. 4.6 Panoul frontal al IV folosit pentru comanda și achiziția semnalelor bateriei în timpul testelor de descărcare în scopul estimării rezistenței interne

În continuare sunt prezentate diagrame bloc tip secvență ale instrumentului virtual utilizat pentru comanda sarcinii electronice, pentru măsurarea și achiziția datelor de la baterii în timpul testelor pentru estimarea capacității maxime a bateriilor. În **Fig. 4.7, 4.8, 4.9, 4.10** sunt prezentate succesiunile de secvențe prin care trece programul de măsurare:

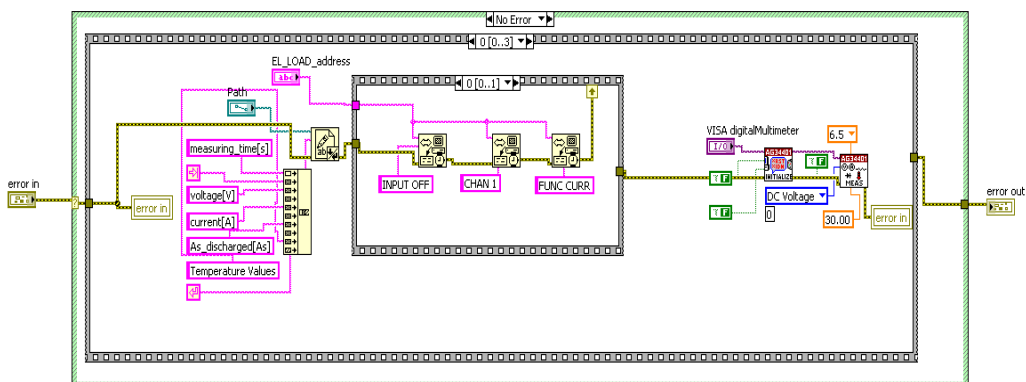


Fig. 4.7 Diagrama bloc tip secvență a IV utilizat pentru comanda, măsurarea și achiziția datelor de la baterii în timpul testelor de descărcare în scopul estimării capacității maxime a bateriei

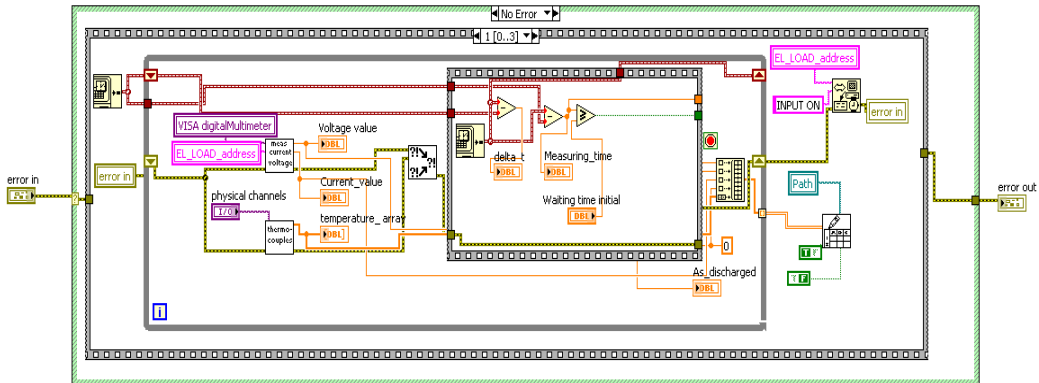


Fig. 4.8 Diagrama bloc tip secvență a IV utilizat pentru comanda, măsurarea și achiziția datelor de la baterii în timpul testelor de descărcare în scopul estimării capacității maxime a bateriei

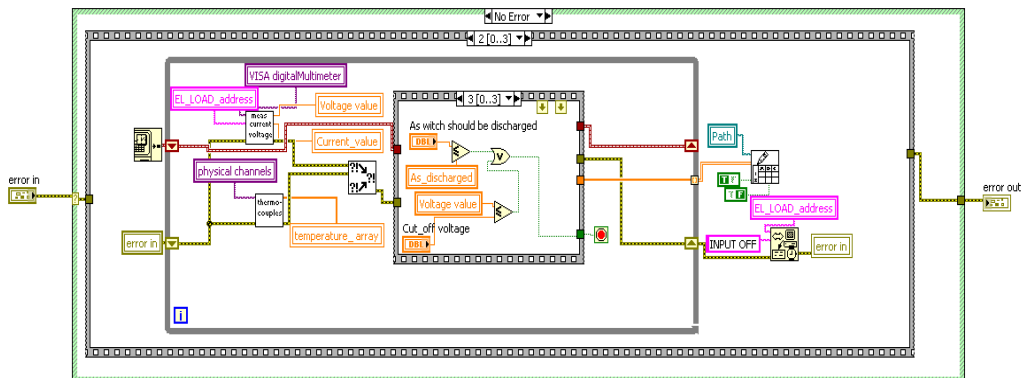


Fig. 4.9 Diagrama bloc tip secvență a IV utilizat pentru comanda, măsurarea și achiziția datelor de la baterii în timpul testelor de descărcare în scopul estimării capacității maxime a bateriei

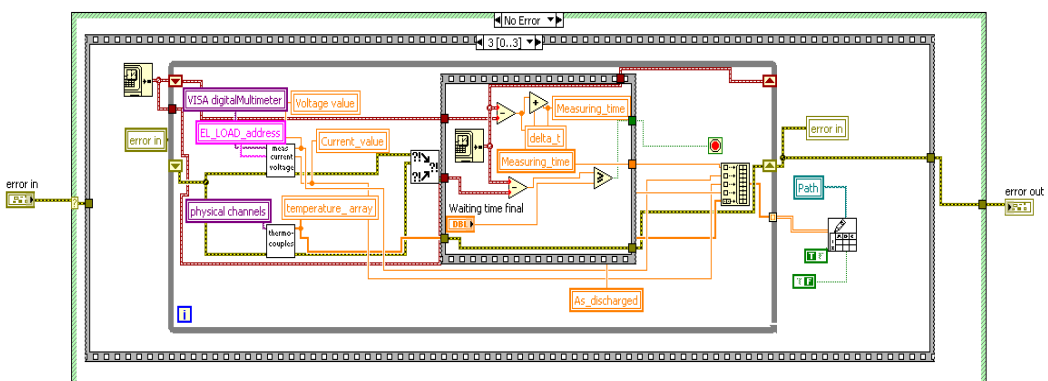


Fig. 4.10 Diagrama bloc tip secvență a IV utilizat pentru comanda, măsurarea și achiziția datelor de la baterii în timpul testelor de descărcare în scopul estimării capacității maxime a bateriei

În **Fig. 4.11** este prezentat panoul frontal al acestui instrument virtual:

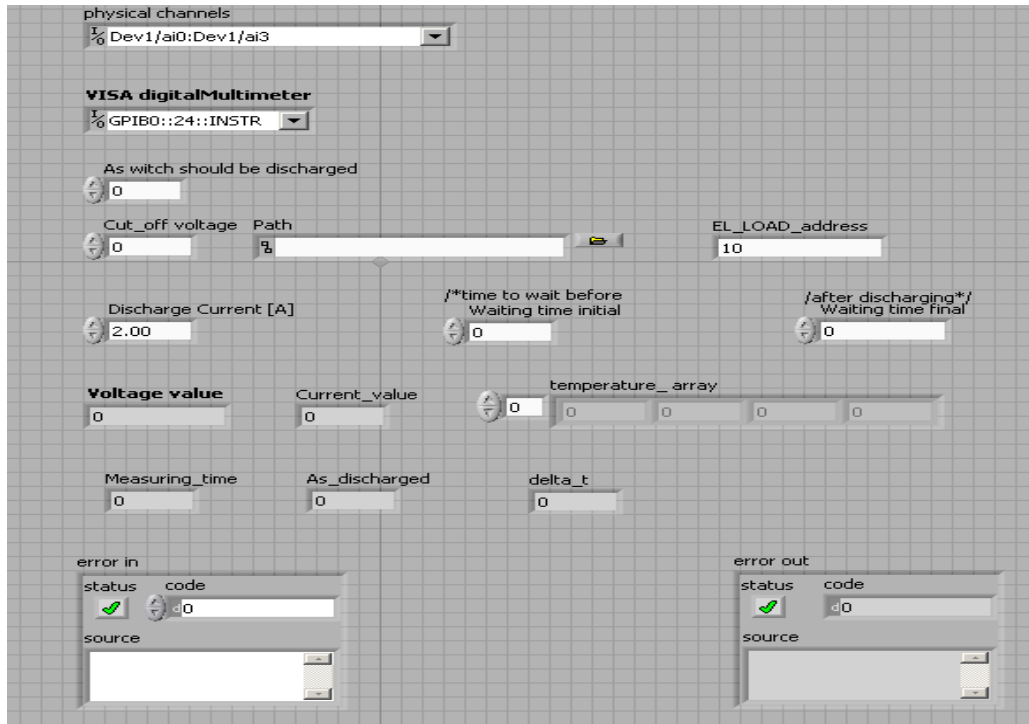


Fig. 4.11 Panoul frontal al IV utilizat pentru comanda, măsurarea și achiziția datelor de la baterii în timpul testelor de descărcare în scopul estimării capacității maxime a bateriei

4.2 Estimarea valorii rezistenței interne a bateriei

4.2.1 Estimarea valorii rezistenței interne a bateriei cu curent de descărcare corespunzător ciclurilor de frânare

Pentru estimarea valorii rezistenței interne a bateriei la diferite temperaturi ale mediului ambiant s-a descărcat bateria cu curent corespunzător pentru două cicluri de frânare, profilul de curent pentru un ciclu de frânare fiind prezentat în **Fig. 3.3**. În timpul descărcării bateriei se măsoară tensiunea, curentul de descărcare și temperatura la suprafața acesteia. Achiziția datelor de la baterie se face la fiecare milisecundă. Rezultatele măsurărilor sunt prezentate în **Fig. 4.12, 4.14, 4.16, 4.18, 4.20, 4.22, 4.24** pentru temperaturi ale mediului ambiant de: -20°C , -10°C , 0°C , 10°C , 20°C , 40°C și 60°C . Parametrii calculați de către algoritmul de diagnosticare sunt prezentați în **Fig. 4.13, 4.15, 4.17, 4.19, 4.21, 4.23** și respectiv **4.25**. Același scenariu de testare s-a folosit pentru toate temperaturile reglate în camera termică. Parametrii estimați pentru fiecare test sunt: rezistența internă a bateriei, starea de încărcare a bateriei, capacitatea maximă a bateriei și în final starea de funcționare a bateriei: aceasta ia valoarea 1 dacă algoritmul de

diagnosticare decide că bateria este capabilă să alimenteze aplicația de frână electrică la parametri necesari unei acționări sigure a acesteia, așa cum a fost prezentat în paragraful 3.2.3. și ia valoarea 0 dacă algoritmul decide că bateria nu mai corespunde cerințelor aplicației și aceasta trebuie înlocuită. În timpul acestor teste de descărcare a bateriilor cu curent corespunzător ciclurilor de frânare, capacitatea maximă a bateriei se estimează doar ținând cont de temperatura la care se află bateria.

În **Fig. 4.12** sunt prezentate curbele curentului și tensiunii bateriei în timpul descărcării acesteia pentru o temperatură a mediului ambiant de -20°C . Se observă că bateria nu poate furniza curentul maxim cerut de aplicație și tensiunea de la bornele ei scade sub 10 [V] – tensiunea minimă necesară aplicației pentru a funcționa în condiții de siguranță. Parametrii estimați ai bateriei sunt prezentați în **Fig.4.13**: rezistența internă – care este estimată de fiecare dată când variația în timp a curentului de descărcare al bateriei este mai mare decât o valoare de prag prestabilită, starea de încărcare a bateriei – care se modifică pe parcursul testului de descărcare, capacitatea maximă a bateriei – care nu se modifică pe parcursul testului și starea de funcționare a bateriei care este 0, deci în aceste condiții bateria nu poate furniza energie la parametri ceruți de aplicație.

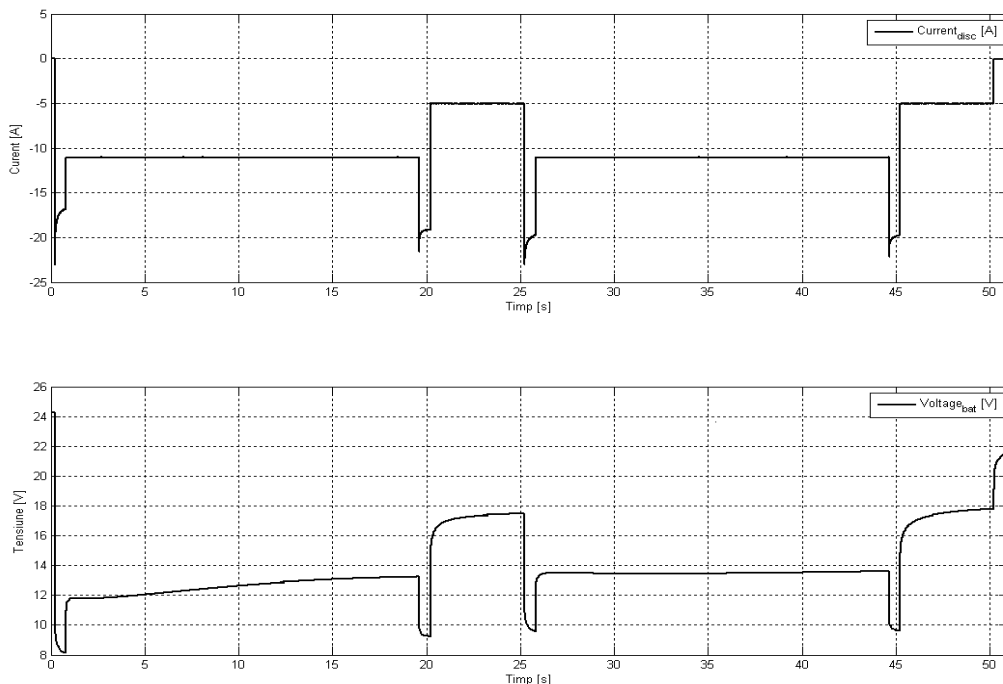


Fig. 4.12 Curentul și tensiunea bateriei în timpul descărcării cu curent corespunzător pentru 2 cicluri de frânare la temperatura -20°C

Rezistența internă a bateriei calculată cu ajutorul relației (3.3) pe baza valorilor măsurate ale tensiunii bateriei înainte și după 500ms după aplicarea curentului de descărcare al bateriei ia valoarea $950\text{ [m}\Omega\text{]}$ la începutul descărcării. De asemenea, valorile tensiunii de la bornele bateriei scad sub 10 [V] - valoare stabilă ca minimă pentru aplicația alimentată.

Starea de încărcare a bateriei la începutul descărcării este 99%, la sfârșitul testului este de 91%. În timpul testului din baterie se descarcă 511 [As] adică 142

96 Testarea algoritmului de diagnosticare și validarea experimentală – 4.

[mAh] – valoare calculată integrând în timp valoarea curentului de descărcare - ceea ce reprezintă 8% din capacitatea maximă a bateriei 1700 [mAh], estimată la temperatura - 20°C pentru un curent de descărcare de 2 [A]. Valorile estimate de algoritm se pot vedea în **Fig. 4.13** de mai jos:

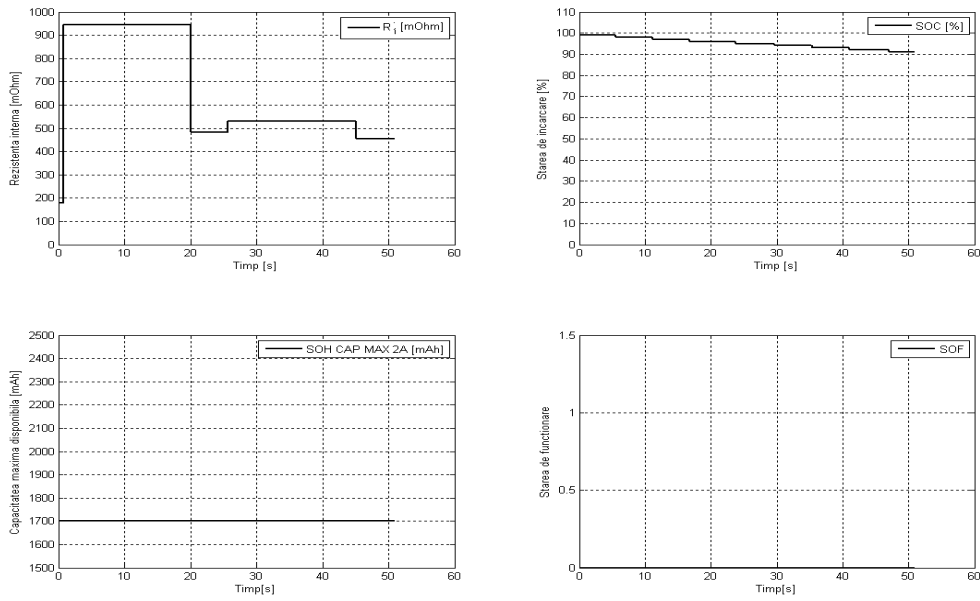


Fig. 4.13 Parametrii calculați ai bateriei pentru 2 cicluri de frână la temperatura -20°C

Pentru temperatura de -10°C graficele curentului și tensiunii bateriei sunt prezentate în **Fig.4.14**. Din forma de variație a acestor grafice se observă că bateria este capabilă să furnizeze profilul de curent cerut și tensiunea de la bornele ei nu scade sub 12 [V].

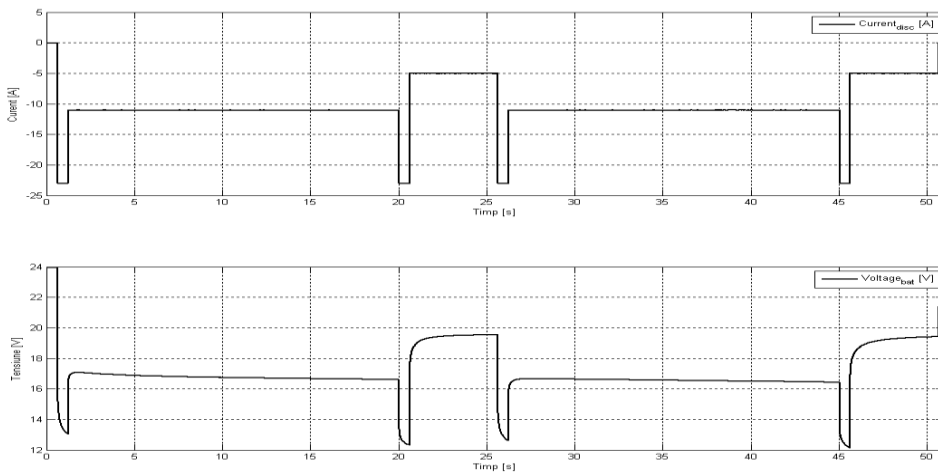


Fig. 4.14 Curentul și tensiunea bateriei în timpul descărcării cu curent corespunzător pentru 2 cicluri de frână la temperatura -10°C

Parametrii bateriei calculați pe baza semnalelor de intrare sunt prezentați în **Fig. 4.15** de mai jos. Rezistența internă calculată pentru prima descărcare cu 23 [A] este 470 [mΩ], valoare sub valoarea maximă admisibilă la -10°C. Starea de încărcare inițială este 80% - stabilită pe baza măsurării tensiunii de mers în gol a bateriei, în final starea de încărcare a bateriei ajunge la 72% - calculată cu ajutorul contorului amperi-oră care integrează în timp valoarea curentului de descărcare. Din baterie se descarcă 560 [As] adică 155.6[mAh] în timpul aplicării celor două cicluri de frânare, ceea ce reprezintă 8.2% din capacitatea maximă estimată a bateriei la temperatura de -10°C, de 1900 [mAh]. Pe baza parametrilor estimați starea de funcționare a bateriei ia valoarea 1, deci algoritmul decide că bateria este capabilă să furnizeze energie la parametrii ceruți de aplicație.

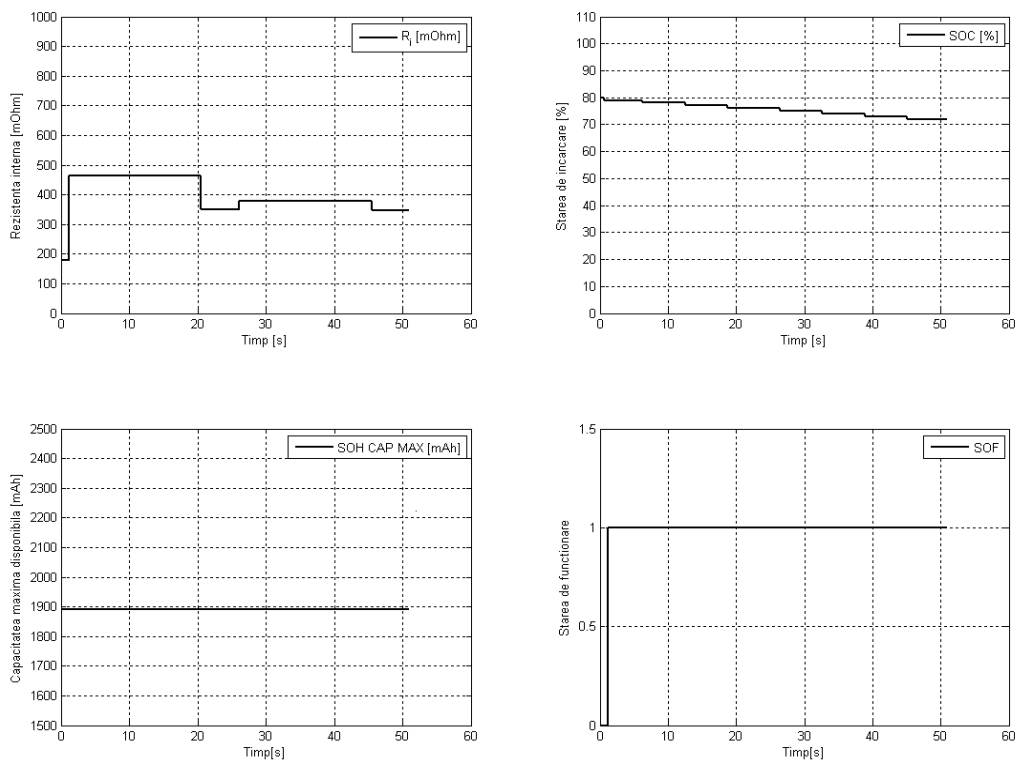


Fig. 4.15 Parametrii calculați ai bateriei pentru 2 cicluri de frânare la temperatura -10°C

Pentru temperatura de 0°C graficele curentului și tensiunii bateriei sunt prezentate în **Fig.4.16**. Se poate observa că bateria furnizează curentul cerut de aplicație și tensiunea la bornele acesteia în timpul descărcării este mai mare decât în cazul descărcării la temperatura de -10°C – aceasta nu scade sub 16 [V].

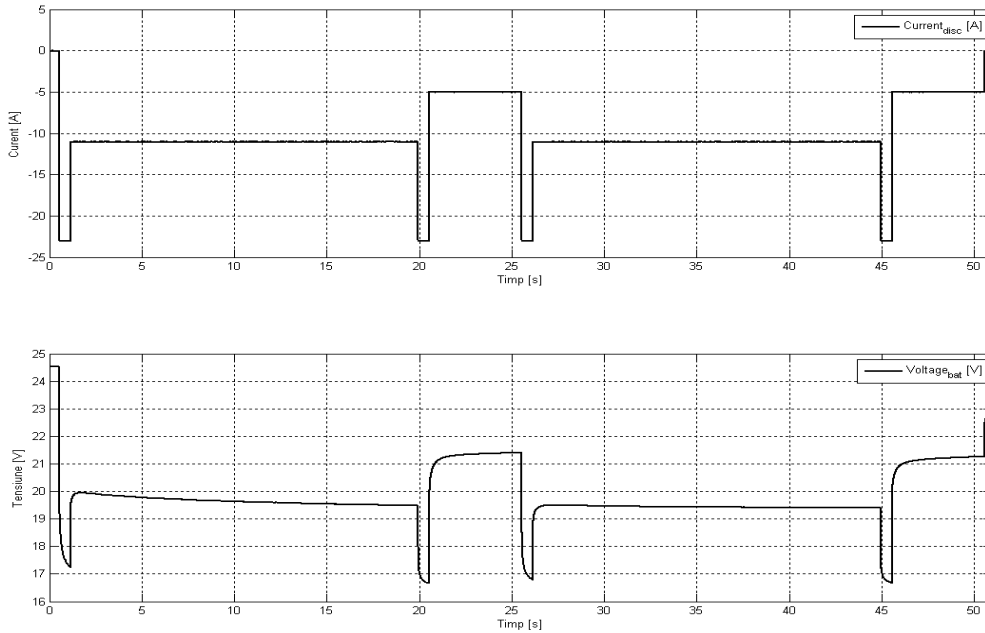


Fig. 4.16 Curentul și tensiunea bateriei în timpul descărcării cu curent corespunzător pentru 2 cicluri de frânare la temperatura 0°C

Parametrii calculați ai bateriei pentru acest caz sunt prezentați în **Fig. 4.7**. Se poate observa că valoarea rezistenței interne estimate 310 [mΩ] este mai mică decât rezistența internă estimată la temperatura -10°C. Valoarea maxim admisibilă a rezistenței la temperatura de 0°C se stabilește cu ajutorul tabelului de valori fixe care este prezentat sub formă grafică în **Fig. 3.8** pentru coeficientul de temperatură al rezistenței. Pentru temperatura de 0°C acesta ia valoarea 0.89, deci valoarea rezistenței maxim admisibile a bateriei trebuie înmulțită cu această valoare a coeficientului de temperatură. La temperatura 0°C valoarea rezistenței interne maxim admisibilă rezultă 560 [mΩ]. Valoarea obținută de 310 [mΩ] este mai mică decât valoarea maxim admisibilă la temperatura de 0°C. Starea de încărcare a bateriei la începutul testului este 100%, la sfârșitul testului aceasta ajungând la 93%. Calculând cantitatea de sarcină electrică descărcată din baterie în timpul testului obținem 560 [As] adică 155.6[mAh], capacitatea maximă a bateriei fiind estimată la 2080 [mAh]. 7.5% din capacitatea bateriei este descărcată în timpul testului, valoare ce corespunde valorii calculate de algoritm pentru SOC. Pe baza parametrilor estimați starea de funcționare a bateriei ia valoarea 1, deci algoritmul decide că bateria este capabilă să furnizeze energie la parametrii ceruți de aplicație.

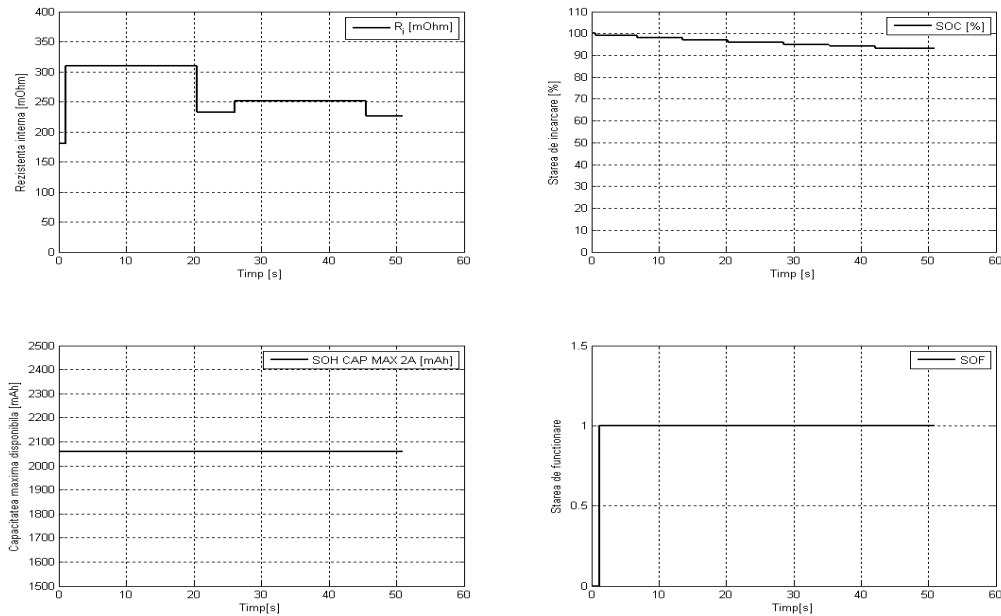


Fig. 4.17 Parametrii calculați ai bateriei pentru 2 cicluri de frânare la temperatura 0°C

Pentru temperatura de 10°C graficele curentului și tensiunii bateriei sunt prezentate în **Fig.4.18**. Bateria furnizează curentul cerut de aplicație și tensiunea la bornele acesteia în timpul descărcării este mai mare decât în cazul descărcării la temperatura de 0°C – aceasta nu scade sub 17 [V]. Căderea de tensiune pe rezistența internă a bateriei este mai mică pentru același curent de descărcare, implicit rezultând că valoarea rezistenței interne a bateriei la temperatura de 10°C este mai mică decât valoarea rezistenței interne a bateriei pentru temperatura de 0°C.

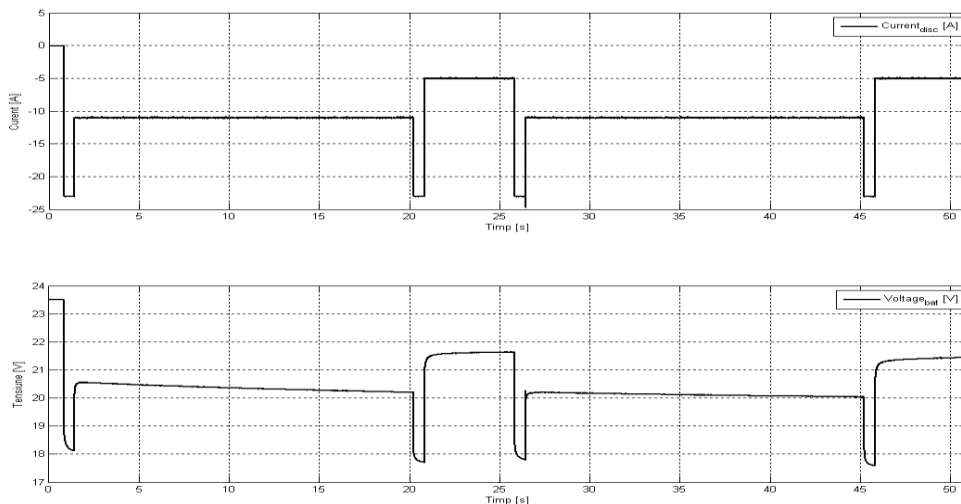


Fig. 4.18 Curentul și tensiunea bateriei în timpul descărcării cu curent corespunzător pentru 2 cicluri de frânare la temperatura 10°C

Parametrii calculați ai bateriei pentru acest caz sunt prezentați în **Fig. 4.19**. Valoarea rezistenței interne a bateriei estimată de algoritmul de diagnosticare este 230 [mΩ] la începutul descărcării, apoi scade la 200 [mΩ]. Valoarea este mai mică decât cea estimată pentru temperatura de 0°C. Pentru temperatura de 10°C valoarea coeficientului de temperatură al rezistenței este 0.66, deci valoarea maximă a rezistenței la temperatura 10°C este 416 [mΩ]. Valoarea estimată a rezistenței interne a bateriei este mai mică decât valoarea maxim admisibilă la temperatura de 10°C.

Starea de încărcare a bateriei la începutul testului este 70%, la sfârșit fiind 63%. Din baterie s-au descărcat 560 [As] adică 155.6[mAh], reprezentând 7.5% - valoare apropiată de cea estimată de algoritm și prezentată în figura de mai jos. Starea de funcționare a bateriei ia valoarea 1, algoritmul de diagnosticare estimând că bateria este capabilă să furnizeze aplicației energie la parametrii ceruți de aceasta.

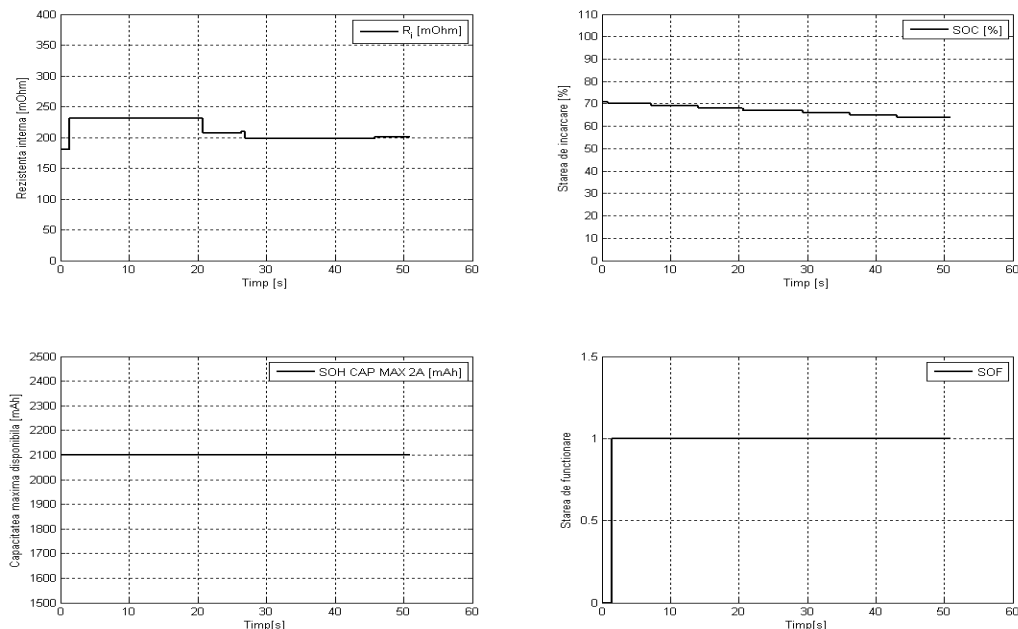


Fig. 4.19 Parametrii calculați ai bateriei pentru 2 cicluri de frânare la temperatura 10°C

Pentru temperatura de 20°C graficele curentului și tensiunii bateriei sunt prezentate în **Fig.4.20**. Tensiunea la bornele bateriei în timpul descărcării nu scade sub 19 [V], căderea de tensiune pe rezistența internă a bateriei este mai mică decât cea anterioară, de la temperatura 10°C, deci rezistența internă a bateriei este mai mică decât cea calculată la 10°C.

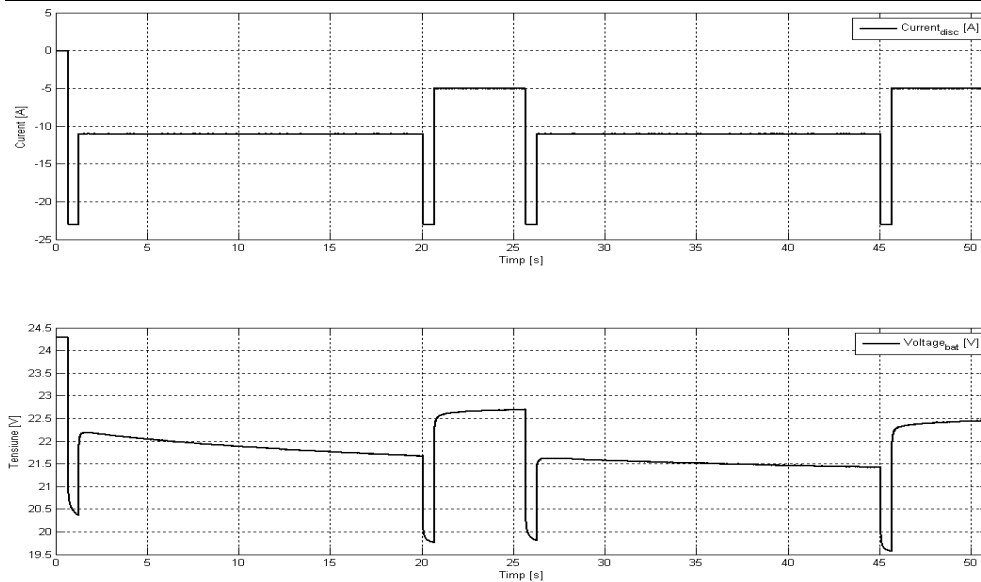


Fig. 4.20 Curentul și tensiunea bateriei în timpul descărcării cu curent corespunzător pentru 2 cicluri de frânare la temperatura 20°C

Parametrii calculați ai bateriei pentru acest caz sunt prezentați în **Fig. 4.21**. Valoarea rezistenței interne a bateriei estimată de algoritmul de diagnosticare este 170 [mΩ] la începutul descărcării, apoi scade la 160 [mΩ]. Valoarea este mai mică decât cea estimată pentru temperatura de 10°C. Pentru temperatura de 20°C valoarea coeficientului de temperatură al rezistenței este 0.5, deci valoarea maximă a rezistenței la temperatura 20°C este 315 [mΩ]. Valoarea esimată a rezistenței interne a bateriei este mai mică decât valoarea maxim admisibilă la temperatura de 20°C. Starea de încărcare a bateriei calculată de algoritmul de diagnosticare scade cu aproximativ 7%, așa cum se poate vedea și în figura de mai jos. Calculând cantitatea de sarcină electrică descărcată din baterie în timpul testului obținem, ca și în cazurile prezentate anterior, 560 [As] adică 155.6 [mAh]. Această valoare reprezintă aproximativ 7.5% din capacitatea maximă estimată a bateriei pentru temperatura de 20°C. Starea de funcționare a bateriei ia valoarea 1, deci bateria este în stare să furnizeze energie la parametrii ceruți de aplicație.

102 Testarea algoritmului de diagnosticare și validarea experimentală – 4.

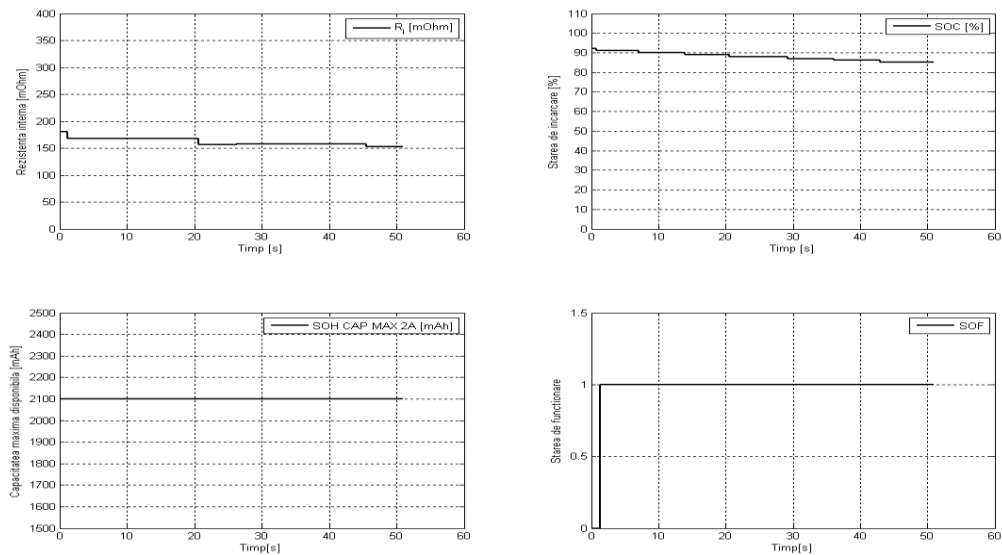


Fig. 4.21 Parametrii calculați ai bateriei pentru 2 cicluri de frânare la temperatura 20°C

În continuare sunt prezentate măsurătorile și parametrii bateriilor calculați la temperaturile de 40°C și 60°C. Se poate observa că valorile rezistenței interne a bateriei se mențin în jurul valorii de 100 [mΩ] în ambele cazuri. Coeficientul de temperatură al rezistenței are valoarea 0.38 pentru temperatura 40°C și 0.31 pentru temperatura 60°C. Valorile maxime ale rezistenței interne a bateriei pentru cele două temperaturi sunt: 239 [mΩ] la 40°C și 195 [mΩ] pentru 60°C. În ambele cazuri algoritmul decide că bateria este capabilă să furnizeze energie la parametrii necesari aplicației, deci parametrul care indică starea de funcționare a bateriei ia valoarea 1.

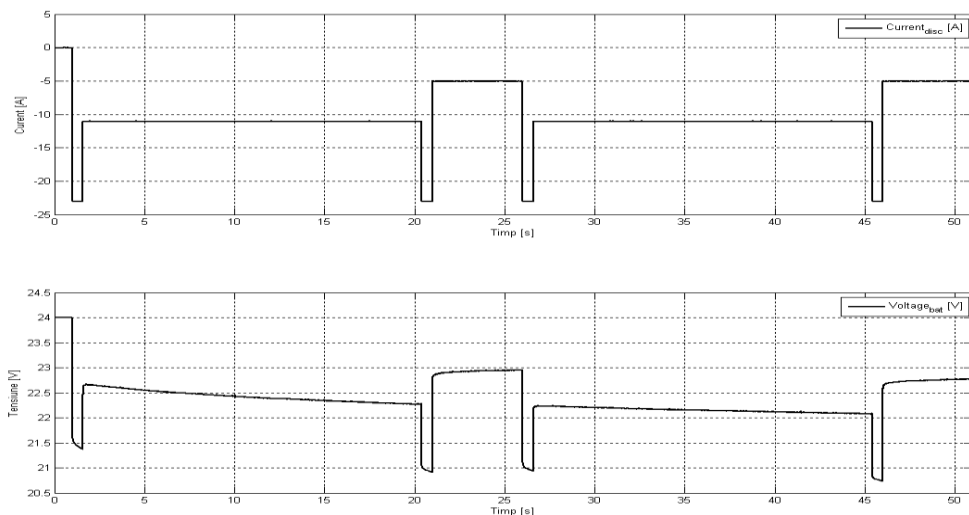


Fig. 4.22 Curentul și tensiunea bateriei în timpul descărcării cu curent corespunzător pentru 2 cicluri de frânare la temperatura 40°C

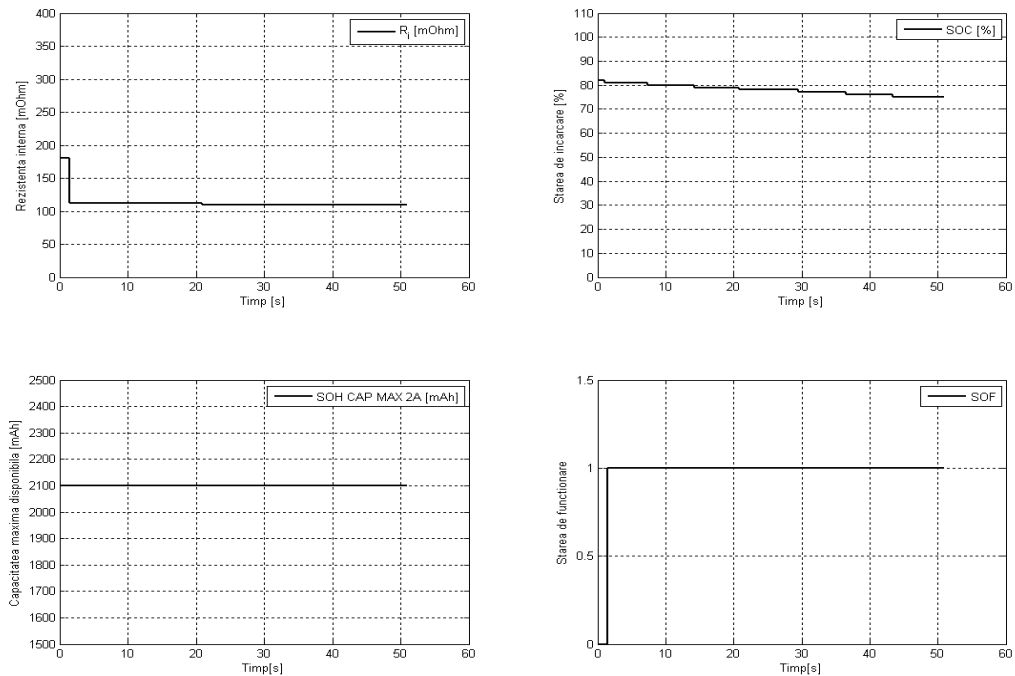


Fig. 4.23 Parametrii calculați ai bateriei pentru 2 cicluri de frânare la temperatura 40°C

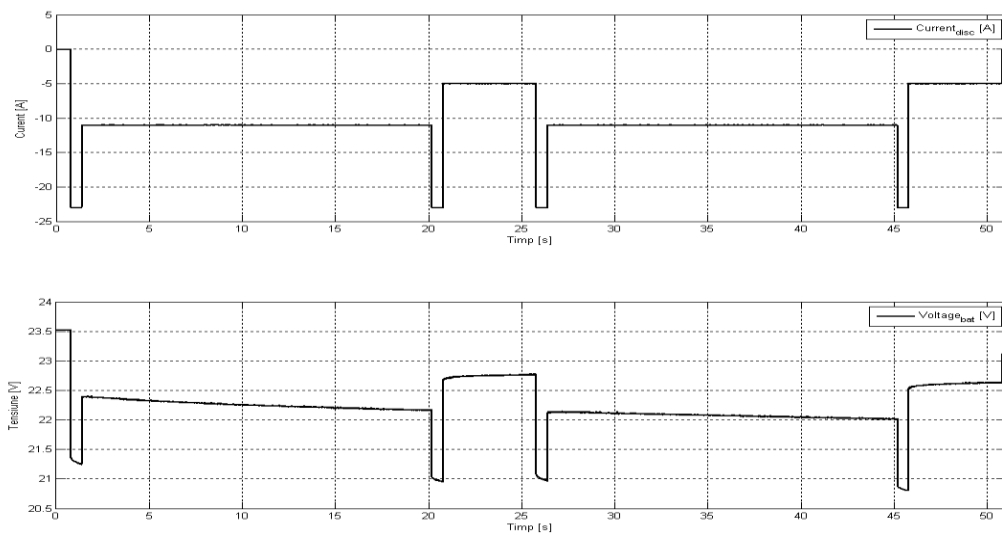


Fig. 4.24 Curentul și tensiunea bateriei în timpul descărcării cu curent corespunzător pentru 2 cicluri de frânare la temperatura 60°C

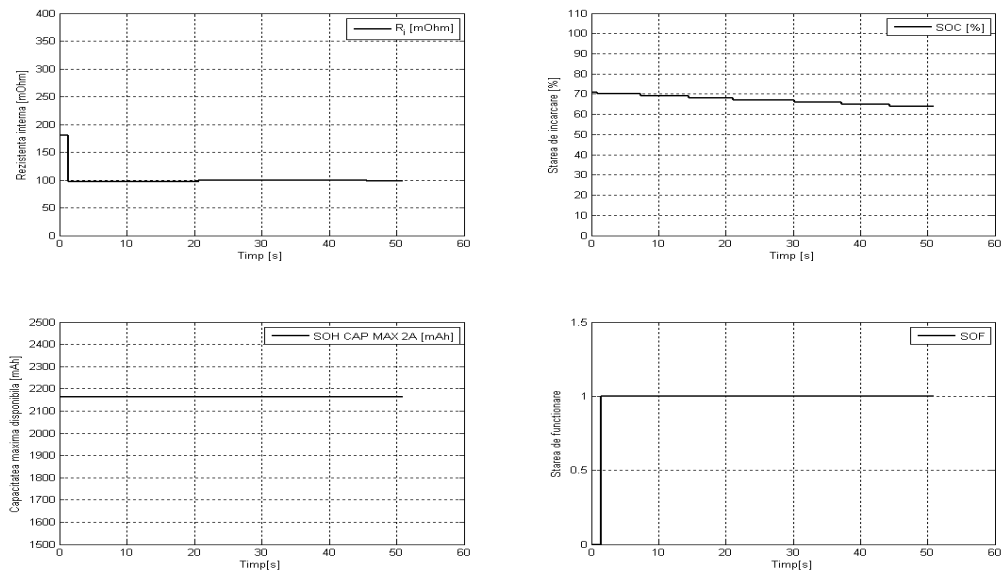


Fig. 4.25 Parametrii calculați ai bateriei pentru 2 cicluri de frânare la temperatura 60°C

4.2.2 Estimarea valorii rezistenței interne a bateriei cu curent de descărcare constant

Un alt scenariu de testare pentru estimarea rezistenței interne a bateriei este descărcarea acesteia prin aplicarea unui curent de descărcare constant (7 [A]) și calcularea rezistenței interne folosind aceeași relație (3.3), timpul din momentul aplicării curentului de descărcare și momentul în care se citește valorile pentru tensiunea și curentul de la baterie rămânând 500 [ms]. S-a ales acest scenariu de testare deoarece bateria se va descărca cu un curent de aproximativ 7 [A] la fiecare pornire a mașinii. Acest lucru este prevăzut deoarece există posibilitatea ca bateria să nu fie folosită perioade foarte lungi de timp pentru frânarea mașinii, bateriile Li-ion fiind sisteme de rezervă, care acționează doar atunci când bateria plumb-acid a mașinii nu poate furniza energie la parametrii ceruți de aplicație. La fiecare pornire a mașinii, sistemele electronice și ansamblul de frânare electric de pe fiecare roată a mașinii execută secvența de inițializare care implică un consum de curent de 7 [A] din baterie. Deci cel mai des rezistența internă a mașinii se va determina cu curent de 7[A]. Dacă temperatura la care se face estimarea rezistenței interne a bateriei este sub 10°C, trebuie ținut cont de faptul că valoarea rezistenței interne depinde și de valoarea curentului de descărcare – vezi **Fig. 3.8, 3.9**. Așa cum se poate observa în cele două figuri amintite, valoarea rezistenței care se obține prin descărcarea cu 7[A] este mai mare decât rezistența internă pentru un curent de 23 [A], la aceeași temperatură. De acest aspect se ține seama prin intermediul caracteristicilor factorului de temperatură al rezistenței pentru diferiți curenți de descărcare (vezi **Fig. 3.8**), caracteristici care sunt stocate de algoritm sub forma unui tabel cu valori fixe .

Pentru câteva temperaturi ale mediului ambiant sunt prezentate în figurile de mai jos datele măsurate de la baterie: tensiunea și curentul în timpul testului de descărcare cu curent constant 7 [A] și parametrii calculați pe baza acestor date. În

Fig. 4.26 sunt prezentate curbele curentului de descărcare și tensiunii de la bornele bateriei pentru temperatura de -10°C .

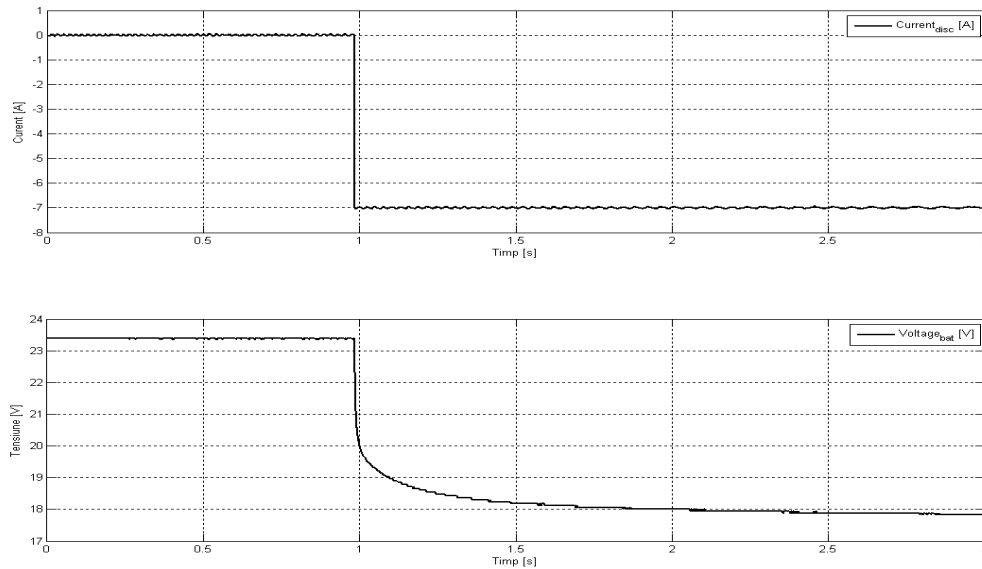


Fig. 4.26 Curentul și tensiunea bateriei în timpul descărcării cu curent constant 7 [A] la temperatura de -10°C

Pe baza datelor măsurate de la baterie – vezi **Fig. 4.26** - algoritmul determină prin ce stări trece bateria. Acest lucru se poate vedea în **Fig. 4.27** de mai jos. În concordanță cu caracteristicile tensiunii și curentului măsurate de la baterie algoritmul determină: la început starea de echilibru, când curentul baterie este 0 și tensiunea de la bornele acesteia nu se modifică, apoi bateria trece în stare de descărcare când curentul descărcat din baterie este 7 [A] și tensiunea de la bornele acesteia scade.

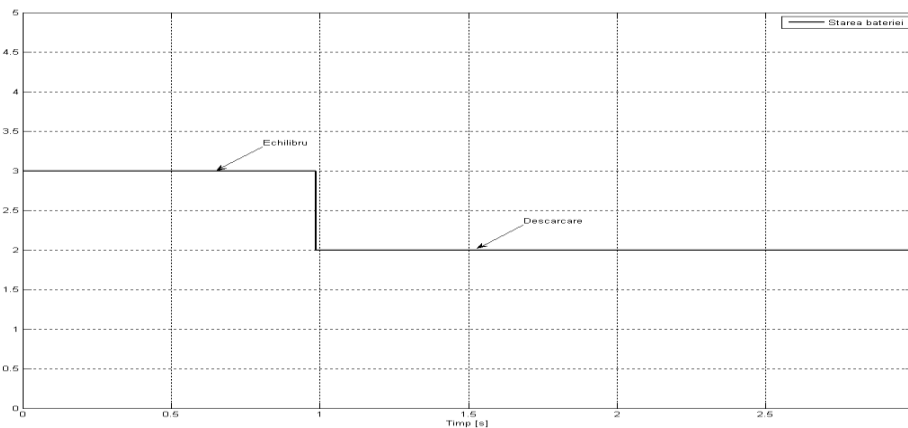


Fig. 4.27 Starea bateriei în timpul testului de descărcare cu un curent constant de 7[A] la temperatura -10°C

În **Fig. 4.28** sunt prezentați parametrii bateriei calculați pe baza datelor prezentate în **Fig. 4.26** și **4.27**. Se poate observa că rezistența internă a bateriei 750 [mΩ] are o valoare mai mare decât rezistența internă estimată la un curent de descărcare de 23 [A] – vezi **Fig. 4.15** – pentru aceeași valoare a temperaturii. Deoarece temperatura la care s-a făcut estimarea rezistenței interne este sub 10°C valoarea acesteia depinde și de valoarea curentului de descărcare al bateriei și deci ea trebuie comparată cu valoarea maximă admisibilă a rezistenței interne adaptată pentru curentul de descărcare de 7 [A]. Valoarea maxim admisibilă pentru rezistența internă a bateriei la temperatura -10°C pentru un curent de descărcare de 7 [A] este 1122 [mΩ]. Această valoare s-a stabilit cu ajutorul tabelului de valori fixe care este prezentat sub formă grafică în **Fig. 3.8** și cunoscând valoarea maxim admisibilă a rezistenței interne a bateriei pentru un curent de descărcare de 23 [A] la temperatura -10°C: 630 [mΩ].

Starea de încărcare a bateriei SOC se determină cu ajutorul tensiunii de mers în gol a bateriei având valoarea 68% la începutul descărcării, apoi se calculează cu ajutorul contorului amperi-oră în timpul descărcării cu 7 [A]. Capacitatea maximă a bateriei se ajustează doar pe baza măsurării temperaturii bateriei, prin intermediul unui tabel cu valori fixe determinat pe cale experimentală.

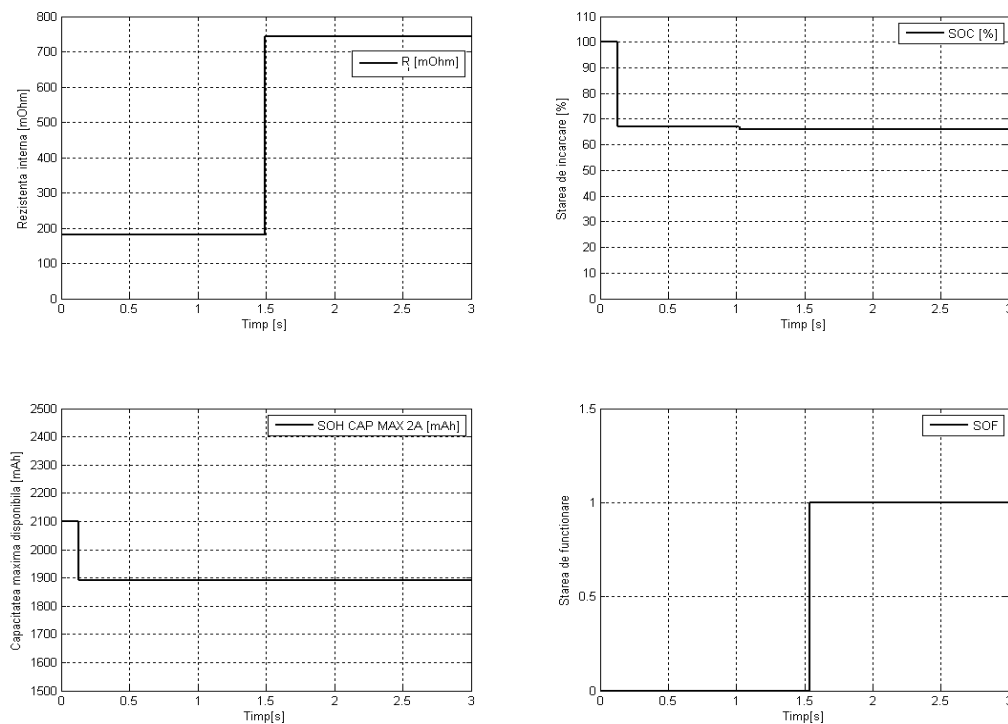


Fig. 4.28 Parametrii calculați ai bateriei pentru un curent de descărcare constant de 7[A] la temperatura -10°C

În **Fig. 4.29** sunt prezentate curbele curentului de descărcare și tensiunii de la bornele bateriei pentru temperatura de 0°C.

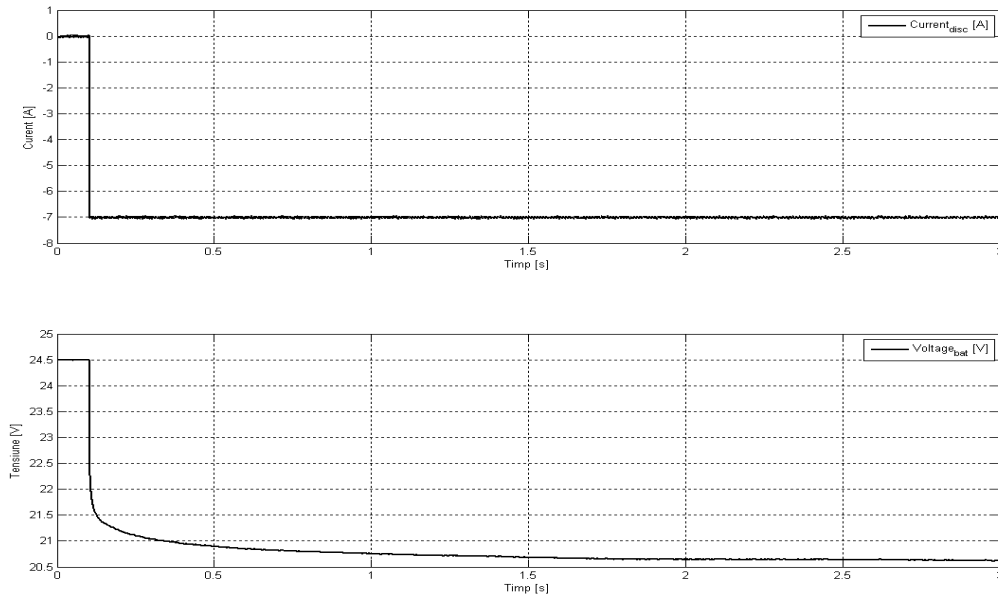


Fig. 4.29 Curentul și tensiunea bateriei în timpul descărcării cu curent constant 7 [A] la temperatura de 0°C

Succesiunea stărilor prin care trece bateria în timpul acestui test este prezentată în **Fig. 4.30** de mai jos:

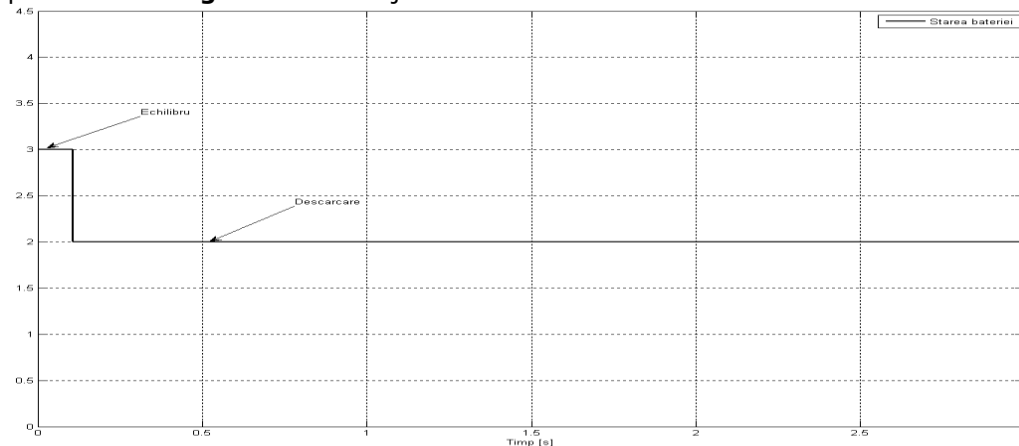


Fig. 4.30 Starea bateriei în timpul testului de descărcare cu un curent constant de 7[A] la temperatura 0°C

Parametrii bateriei calculați pe baza datelor măsurate de la baterie sunt prezentați în **Fig. 4.31**. Rezistența internă a bateriei calculată de către algoritmul ia valoarea 520 [mΩ], mai mică decât rezistența internă la temperatura -10°C pentru un curent de descărcare de 7 [A], calculată după un timp de 500 [ms] după aplicarea curentului de descărcare.

Starea de încărcare a bateriei este stabilită inițial pe baza valorii măsurate a tensiunii de mers în gol a bateriei (100%), apoi, când bateria este în stare de descărcare se calculează pe baza contorului amperi-oră. Capacitatea maximă utilă a

108 Testarea algoritmului de diagnosticare și validarea experimentală – 4.

bateriei se estimează pe baza temperaturii bateriei, prin intermediul unui tabel cu valori fixe, așa cum a fost prezentat și în cazul anterior. În final, algoritmul decide că bateria este capabilă să furnizeze energie la parametrii ceruți de aplicație, starea de funcționare ia valoarea 1.

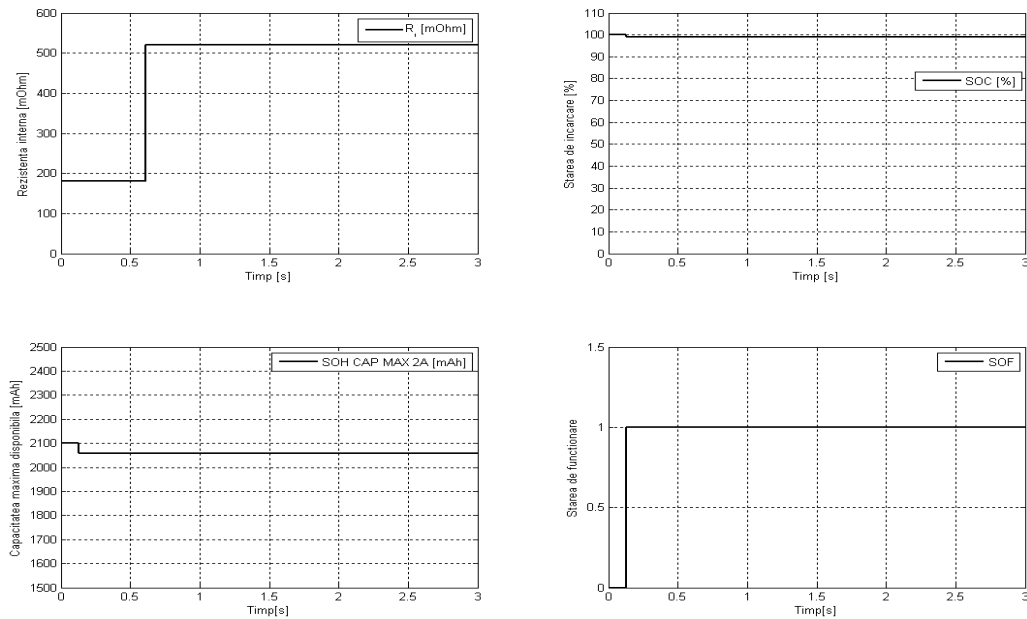


Fig. 4.31 Parametrii calculați ai bateriei pentru un curent de descărcare constant de 7[A] la temperatura 0°C

În continuare sunt prezentate rezultatele testelor efectuate pentru temperaturile 20°C, 40°C și respectiv 60°C. Bateriile s-au descărcat cu 7 [A] iar rezistența internă a lor s-a calculat după 500 [ms] după aplicarea curentului de descărcare. Se poate observa din graficele din **Fig. 4.33**, **4.35** și **4.37** că valorile rezistenței estimate pentru un curent de descărcare de 7 [A] sunt foarte apropiate de valorile estimate pentru un curent de descărcare de 23 [A] prezentate în graficele din **Fig. 4.21**, **4.23** și respectiv **4.25** pentru aceeași temperatură. Aceste rezultate sunt în concordanță cu rezultatele prezentate în **Fig. 3.8** referitoare la variația rezistenței interne a bateriei cu temperatura acesteia și cu valoarea curentului de descărcare. În **Fig. 3.8** se observă că la temperaturi peste 10°C valoarea rezistenței interne a bateriei depinde numai de temperatura bateriei și nu și de valoarea curentului de descărcare. Da asemenea, se poate observa că valoarea rezistenței interne a bateriei la temperaturi sub 10°C este mai mare pentru valori mai mici ale curentului – valoarea rezistenței interne a bateriei este mai mare pentru un curent de descărcare de 7 [A] decât pentru un curent de descărcare de 23 [A] în aceleași condiții de temperatură.

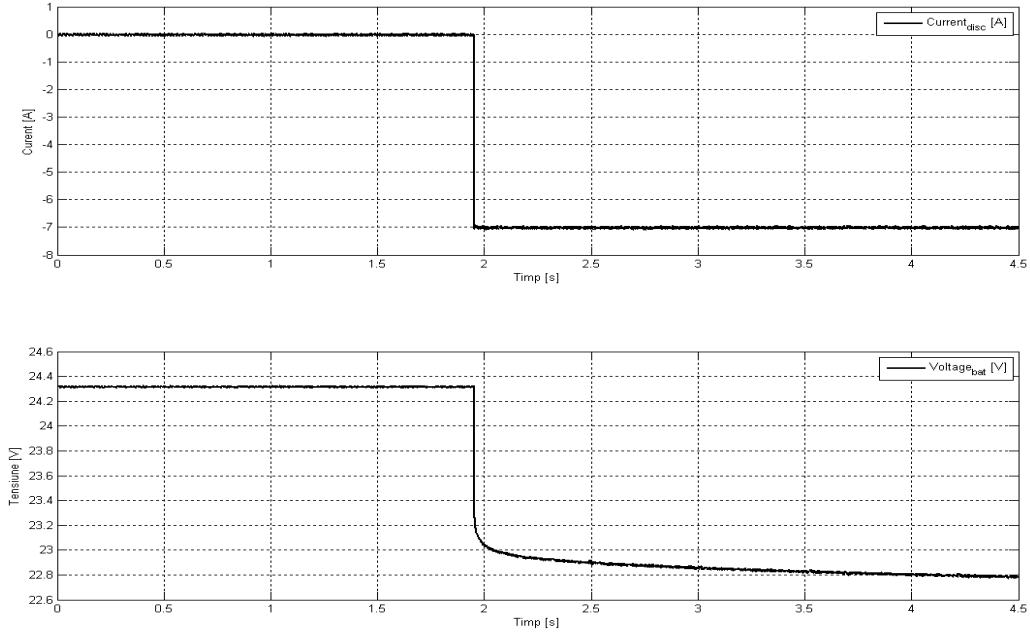


Fig. 4.32 Curentul și tensiunea bateriei în timpul descărcării cu curent constant 7 [A] la temperatura de 20°C

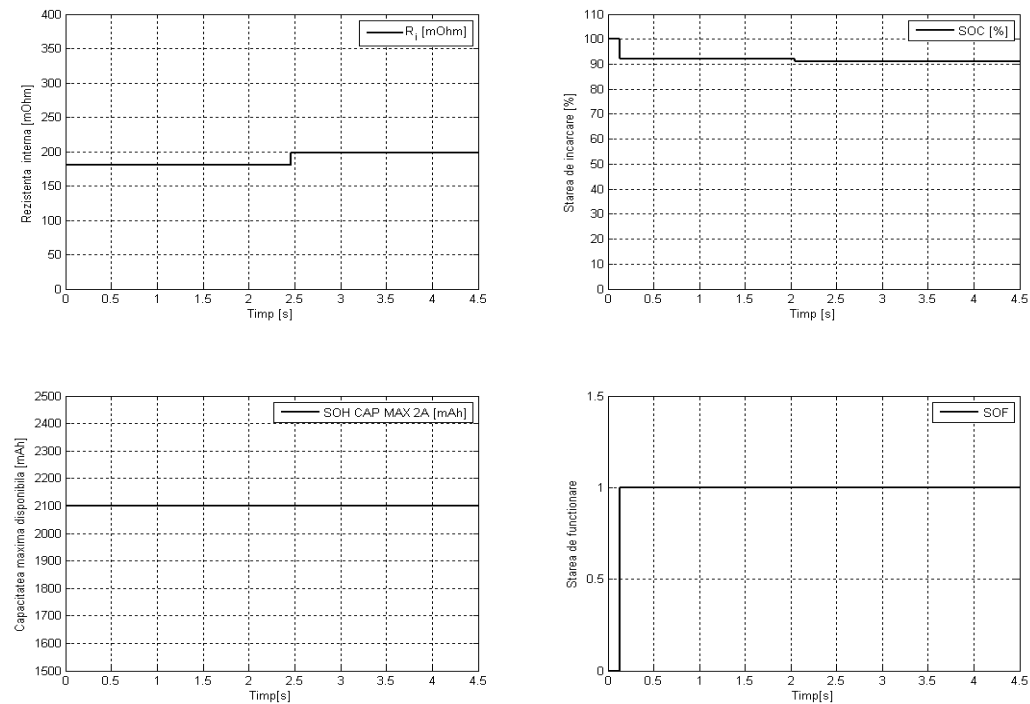


Fig. 4.33 Parametrii calculați ai bateriei pentru un curent de descărcare constant de 7[A] la temperatura 20°C

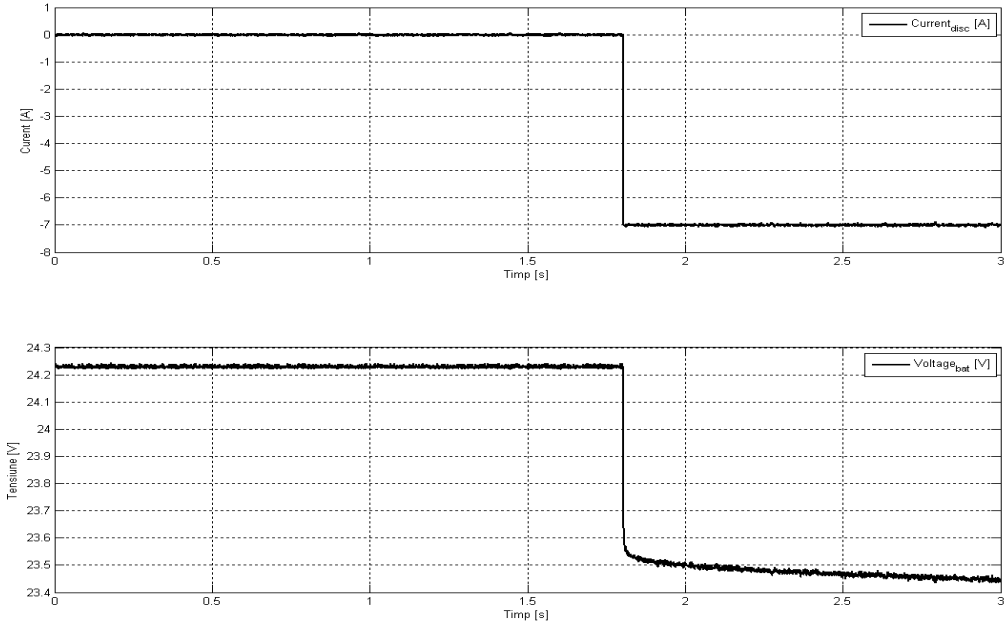


Fig. 4.34 Curentul și tensiunea bateriei în timpul descărcării cu curent constant 7 [A] la temperatura de 40°C

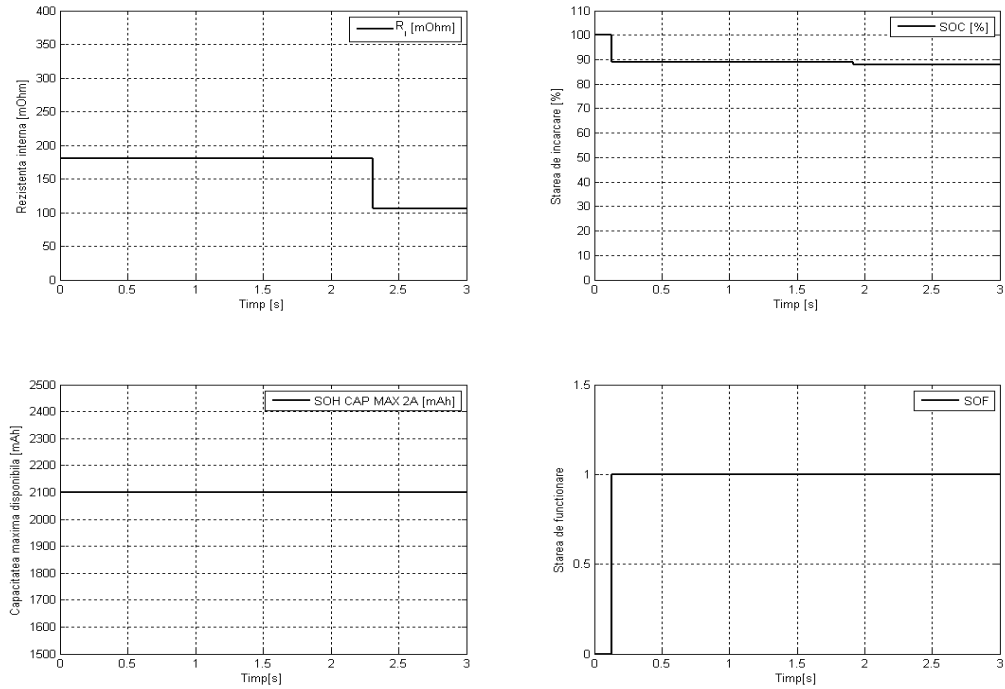


Fig. 4.35 Parametrii calculați ai bateriei pentru un curent de descărcare constant de 7[A] la temperatura 40°C

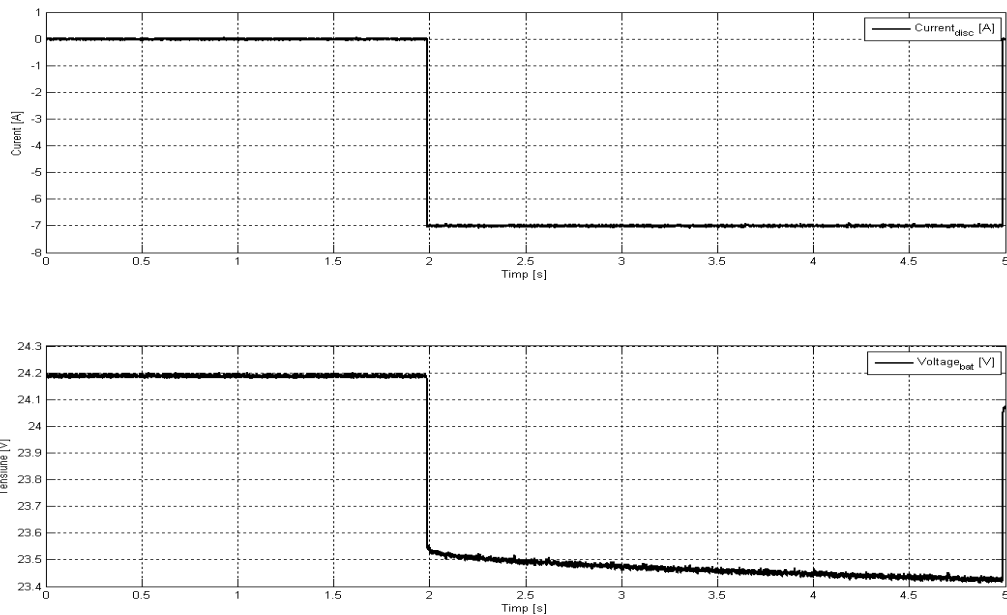


Fig. 4.36 Curentul și tensiunea bateriei în timpul descărcării cu curent constant 7 [A] la temperatura de 60°C

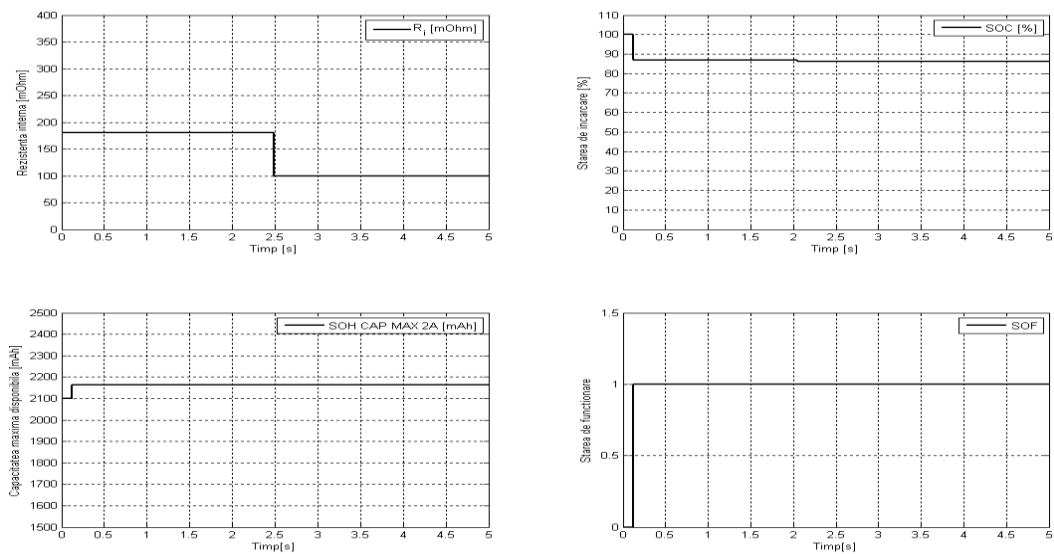


Fig. 4.37 Parametrii calculați ai bateriei pentru un curent de descărcare constant de 7[A] la temperatura 60°C

În continuare sunt prezentate rezultatele testelor de descărcare efectuate în scopul determinării rezistenței interne a bateriilor. În Fig. **4.38**, **4.39**, **4.40** și **4.41** sunt sintetizate rezultatele experimentelor efectuate: s-au descărcat celule Li-ion cu curenți de descărcare diferiți: 23 [A], 15 [A], 10 [A] și 2 [A] la temperaturi diferite

în intervalul $[-20, 60]$ °C. Celulele s-au introdus în camera termică Votsch 4002 și s-a prescris temperatura dorită. După ce celula supusă testului a ajuns la temperatura dorită, acesteia i s-a aplicat curentul de descărcare cu ajutorul sarcinii electronice. S-au achiziționat la fiecare milisecundă valorile de tensiune și curent de la celulă. Cu ajutorul relației (3.3) s-a calculat valoarea rezistenței interne a celulei pentru un interval de timp din momentul aplicării curentului de descărcare cuprins între 1 milisecundă și 500 de milisecunde. Graficele rezultate sunt prezentate mai jos, pentru fiecare curent de descărcare.

Variația rezistenței interne în timp la descărcarea cu 23A

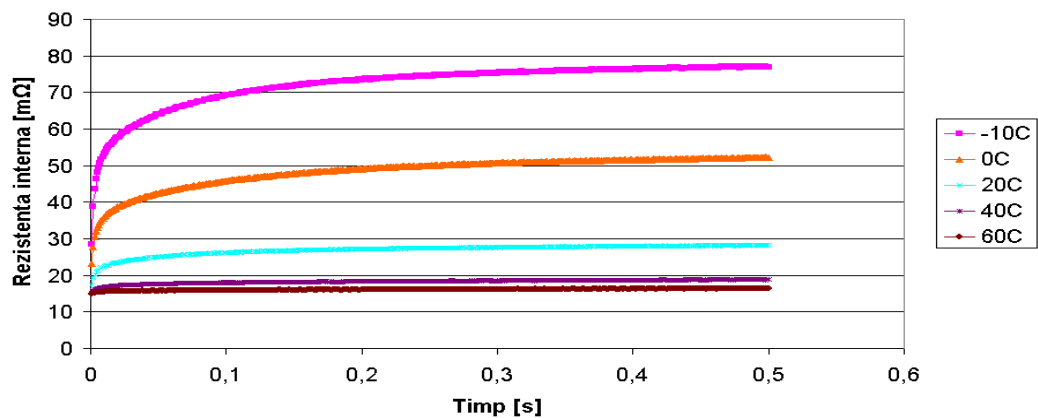


Fig. 4.38 Variația în timp a rezistenței interne a celulei la descărcarea cu curent 23 [A] pentru diferite temperaturi

Variația rezistenței interne în timp la descărcarea cu 15A

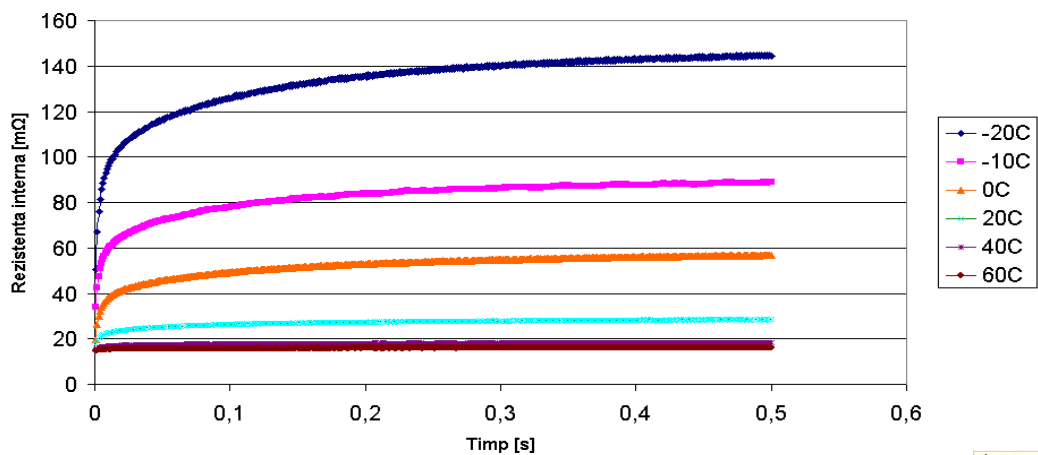


Fig. 4.39 Variația în timp a rezistenței interne a celulei la descărcarea cu curent 15 [A] pentru diferite temperaturi

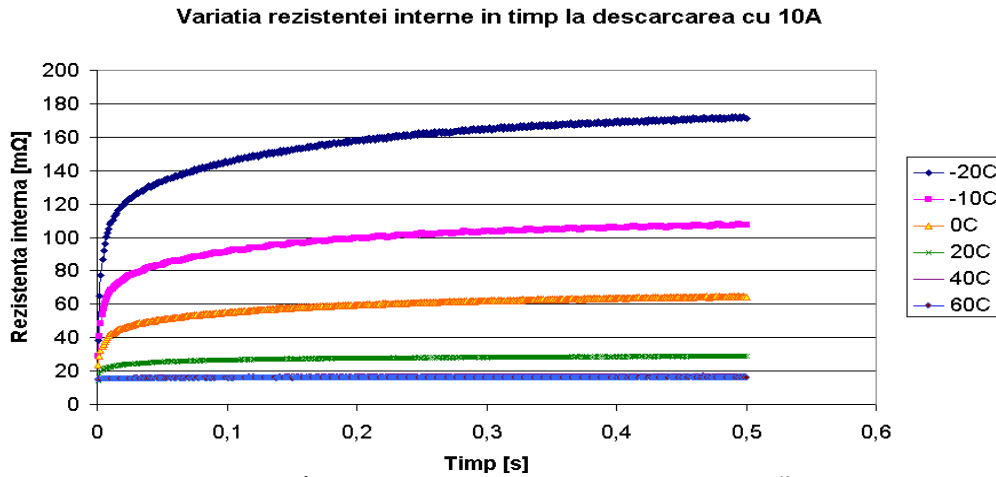


Fig. 4.40 Variația în timp a rezistenței interne a celulei la descărcarea cu curent 10 [A] pentru diferite temperaturi

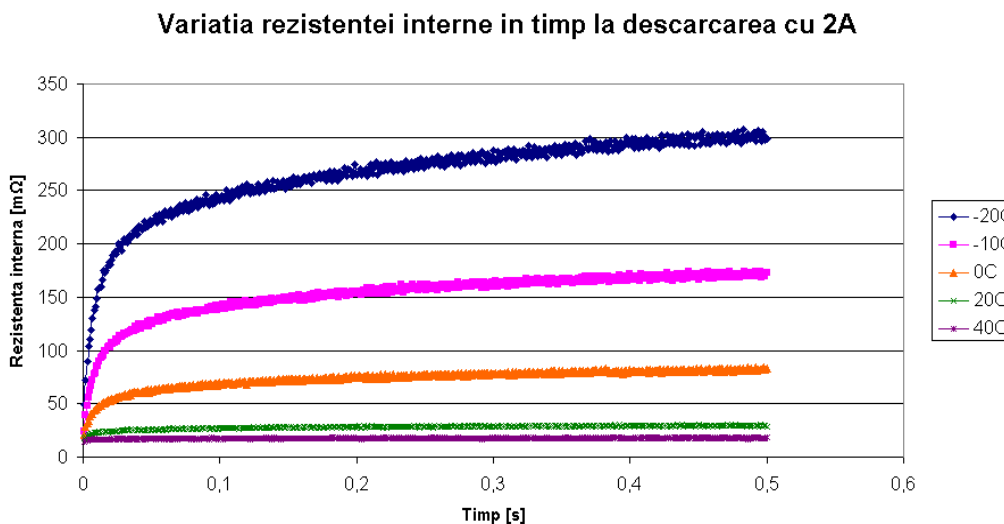


Fig. 4.41 Variația în timp a rezistenței interne a celulei la descărcarea cu curent 2 [A] pentru diferite temperaturi

Din rezultatele experimentale prezentate mai sus se pot trage unele concluzii:

- pentru temperaturi de peste 20°C valoarea rezistenței interne depinde doar de valoarea temperaturii, nu și de valoarea curentului de descărcare.
- comparând valorile rezistenței interne obținute în urma testelor cu cele obținute în urma rulării algoritmului de diagnosticare (ținând cont de faptul că testele s-au făcut cu ajutorul celulelor individuale, nu cu baterii realizate din 6 celule), se observă o foarte bună corelare între acestea. Comparativ, în tabelele 4.1 și 4.2 de mai jos, se pot vedea diferențele dintre rezultatele experimentale și cele estimate de algoritmul de diagnosticare în ceea ce privește rezistența internă:

114 Testarea algoritmului de diagnosticare și validarea experimentală – 4.

Tab. 4.1 Comparație între valorile experimentale obținute pentru rezistențele interne ale celulelor și valorile estimate de algoritmul de diagnosticare, pentru diferite temperaturi, curentul de descărcare 23 [A]

Temperatura[°C]	Rezistența internă celulă - experimental [mΩ]	Rezistența internă celulă estimată [mΩ]	Eroare [%]
-10	78	80	2.56
0	51	52	1.96
20	28	28	0
40	20	18	10
60	20	17	15

Tab. 4.2 Comparație între valorile experimentale obținute pentru rezistențele interne ale celulelor și valorile estimate de algoritmul de diagnosticare, pentru diferite temperaturi, curentul de descărcare 7[A]

Temperatura[°C]	Rezistența internă celulă - experimental [mΩ]	Rezistența internă celulă estimată [mΩ]	Eroare [%]
-10	120	122	1.67
0	85	87	2.35
20	30	33	10
40	23	18	21.7
60	20	17	15

- din tabelele de mai sus se poate observa că, în valoare absolută, diferențele dintre valorile obținute pentru rezistențelor interne diferă cu maxim 5 [mΩ], procentual acestea fiind mai mari pentru valori mici ale rezistențelor interne, valori care se obțin la temperaturi peste 20°C.

- diferențele dintre estimarea scăderii stării de încărcare a bateriilor din timpul testelor de descărcare cu curent corespunzător pentru 2 cicluri de frânare cu valorile obținute experimental arată de asemenea o foarte bună corelare între acestea, diferențele fiind, în valoare absolută, de sub 1%. În tabelul 4.3 se pot compara rezultatele experimentale și cele estimate de algoritmul de diagnosticare, pentru scăderea stării de încărcare:

Tab. 4.3 Comparație între valorile experimentale obținute pentru scăderea sării de încărcare a celulelor și valorile estimate de algoritmul de diagnosticare, pentru diferite temperaturi, descărcare cu 2 cicluri de frânare

Temperatura[°C]	ΔSOC [%]- experimental	ΔSOC [%]- estimat	Eroare [%]
-20	8	8	0
-10	8.2	8	2.5
0..40	7.5	7	6.7
60	7.1	7	1.4

4.3 Estimarea valorii capacității maxime utile a bateriei

Pentru a estima valoarea capacității maxime utile a bateriei s-au efectuat teste de descărcare a acesteia cu curent constant (2 [A]) după metoda prezentată în paragraful 3.2.2 punctul B și ilustrată în **Fig. 3.10**. După cum s-a precizat în paragraful menționat, algoritmul de management al utilizării bateriilor permite ca o singură baterie să se descarce la un moment dat, aceste descărcări făcându-se la intervale lungi de timp, de ordinul lunilor. În timpul acestor teste bateria nu se descarcă complet, doar o anumită parte din sarcina electrică stocată în baterie este descărcată – aceasta fiind contorizată în timpul testului. Intervalul de timp în care se face descărcarea se contorizează și de asemenea se contorizează timpul trecut din momentul în care s-a oprit descărcarea și momentul când bateria a ajuns în stare de echilibru și se măsoară tensiunea la bornele ei. Cu ajutorul valorii tensiunii măsurate de la baterie în stare de echilibru se determină, pe baza tabelului cu valori fixe, starea de încărcare a bateriei după descărcarea controlată a acesteia. Cu relația (3.8) se calculează capacitatea maximă disponibilă a bateriei la temperatura la care se face descărcarea și corespunzătoare unui curent de descărcare de 2 [A]. Producătorul bateriilor specifică o capacitate a acestora de 2500 [mAh] pentru un curent de descărcare 0.2C ($=0.2 \cdot 2.5 = 0.5$ [A]). Pentru verificare s-au efectuat câteva teste de descărcare a celulelor cu curent constant 0.5 [A] la temperatura 25°C. Una din curbele de descărcare se poate vedea în **Fig. 4.42**. Capacitatea utilă maximă a celulei, măsurate în urma testului de descărcare este de 8585 [As], adică aproximativ 2380 [mAh].

Testele efectuate în laborator arată că pentru un curent de descărcare de 2 [A] capacitatea maximă utilă a bateriei se situează în jurul valorii de 2100 [mAh] pentru temperaturi de 25⁰-30°C, tensiunea inițială a bateriei fiind de 24.48 [V] (pentru o celulă 4.08 [V], pentru 6 celule conectate în serie: $6 \cdot 4.08 = 24.48$ [V]) și o tensiune finală la care se consideră bateria complet descărcată de 15 [V] (pentru o celulă 2.5 [V]). De asemenea, în urma efectuării testelor s-a observat că tensiunea maximă, inițială, de la care s-a început descărcarea influențează valoarea capacității maxime utile a bateriilor.

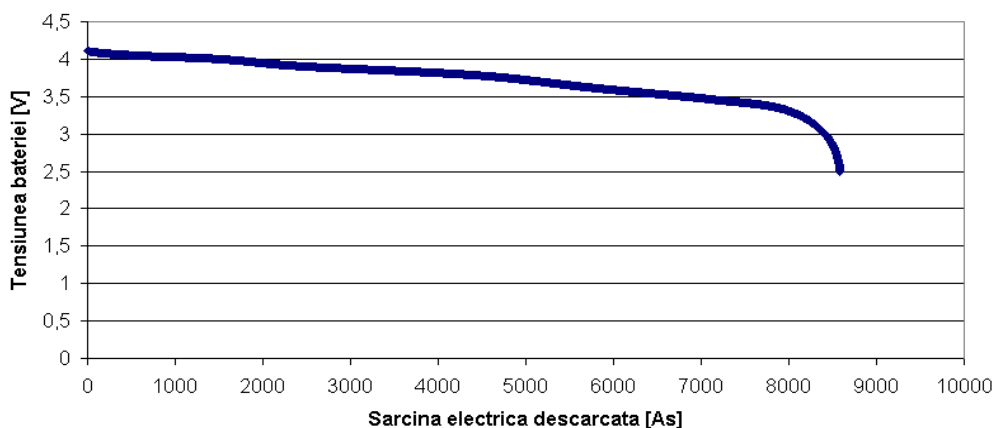


Fig. 4.42 Curba de descărcare cu curent constant 0.5 [A] ($=0.2C$) pentru o celulă la temperatura 25°C

Testele de descărcare controlată a bateriei s-au efectuat la temperaturi cuprinse 10°C și 55°C . Acest interval de temperatură este specificat în cerințele sistemului, pe de o parte pentru a nu descărca bateriile la temperaturi joase și în acest fel aplicația să rămână fără rezerve de energie electrică, pe de altă parte pentru a nu suprasolicita bateriile la temperaturi peste 55°C , știind că la temperaturi mari se accelerează procesul de îmbătrânire a acestora. Timpul de descărcare a fost de 10 minute (600 [s]), cantitatea de sarcină descărcată din baterie în timpul testului este de 1200 [As] sau 333.33 [mAh], adică aproximativ 16% din capacitatea maximă utilă a acesteia (2100 [mAh]). La temperatura 10°C datele măsurate la baterie sunt prezentate în **Fig. 4.43**:

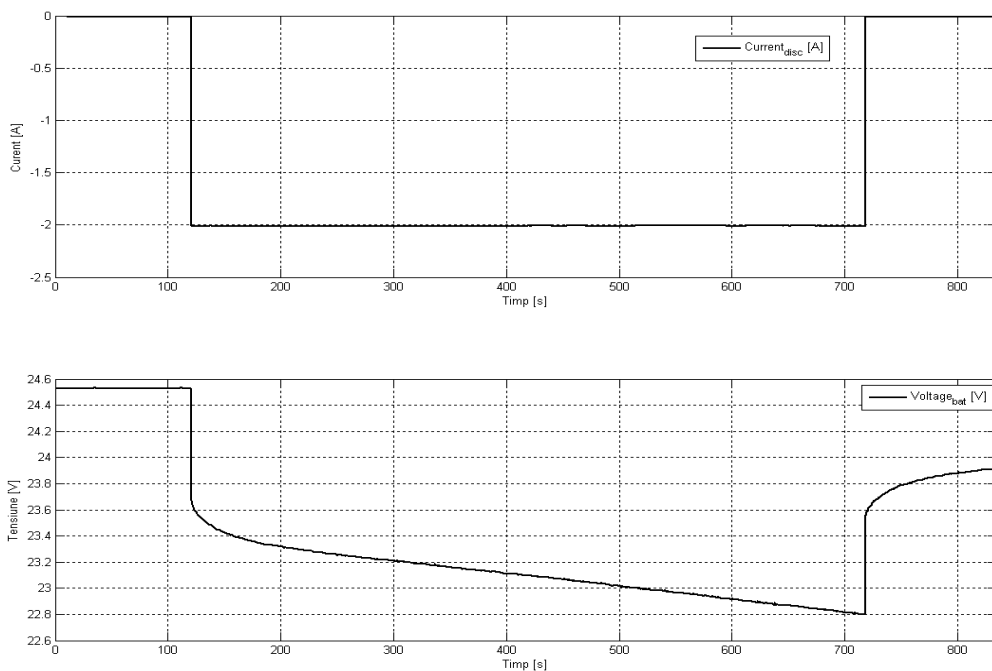


Fig. 4.43 Tensiunea și curentul bateriei în timpul descărcării controlate a acesteia la temperatura 10°C

Pe baza datelor prezentate mai sus algoritmul estimează capacitatea maximă utilă a bateriei la temperatura de 10°C pentru un curent de descărcare de 2 [A]. Parametrii estimați de algoritm sunt prezentați în **Fig. 4.44**:

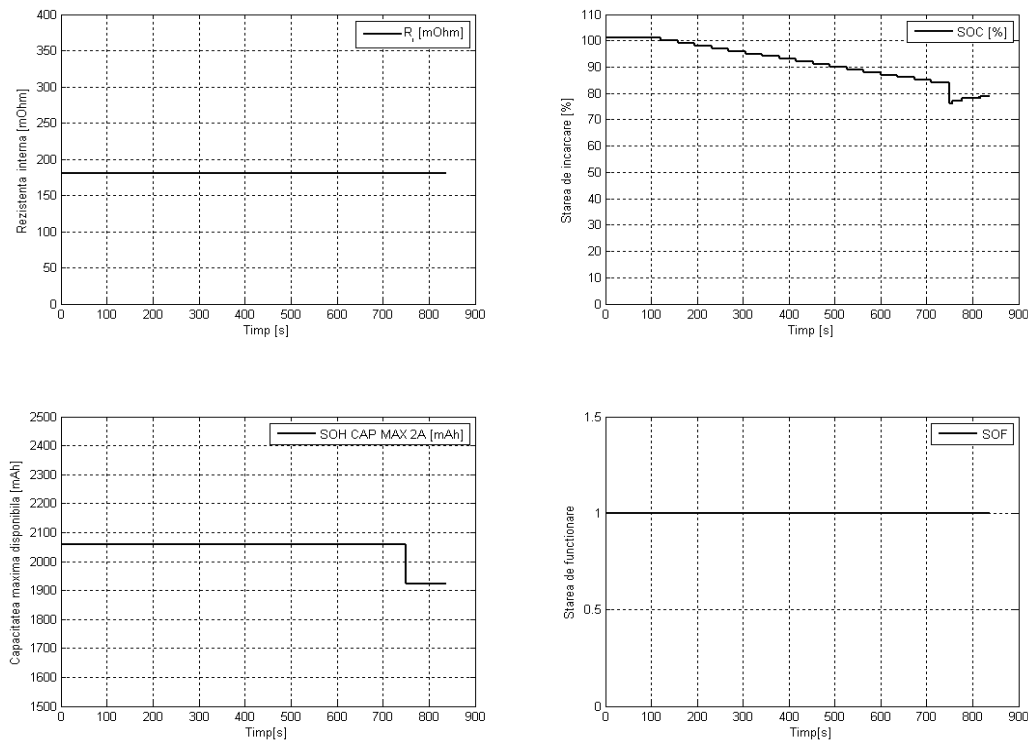


Fig. 4.44 Parametrii estimați ai bateriei în urma testului de descărcare controlată a acesteia cu curent constant de 2 [A] la temperatura 10°C

Se poate observa din **Fig. 4.44** că valoarea estimată a capacității utile a bateriei – aproximativ 1900 [mAh] – este mai mică decât cea măsurată (de aproximativ 2100 [mAh]), aceasta deoarece tensiunea de la bornele acesteia după terminarea descărcării crește încet, gradientul de creștere a tensiunii este mic, algoritmul consideră că bateria a ajuns în starea de echilibru. În timpul descărcării starea de încărcare a bateriei scade – de la starea inițială aprox. 100% la 84-85% în momentul întreruperii descărcării, deci o descreștere de 16%, ceea ce corespunde calculului făcut anterior. După încetarea descărcării algoritmul estimează starea de încărcare momentanee a bateriei pe baza tensiunii de funcționare în gol a acesteia, starea de încărcare crescând încet, odată cu tensiunea de revenire a bateriei. După cum se poate vedea în **Fig. 4.43** tensiunea bateriei nu este constantă în timp, ea crește foarte încet după terminarea descărcării.

O altă explicație ar fi faptul că atunci când se descarcă complet bateria cu un curent constant aceasta se autoîncălzeste și deci în final bateria are o temperatură mai mare decât cea pe care a avut-o inițial. De acest lucru – autoîncălzirea bateriei în timpul descărcării – modelul nu ține cont.

În **Fig. 4.45** de mai jos se poate observa un test de descărcare completă a unei celule la temperatura 10°C cu un curent constant de 2 [A]. După cum se poate observa, sarcina electrică totală descărcată este în jurul valorii de 7650 [mAh], adică aproximativ 2100 [mAh].

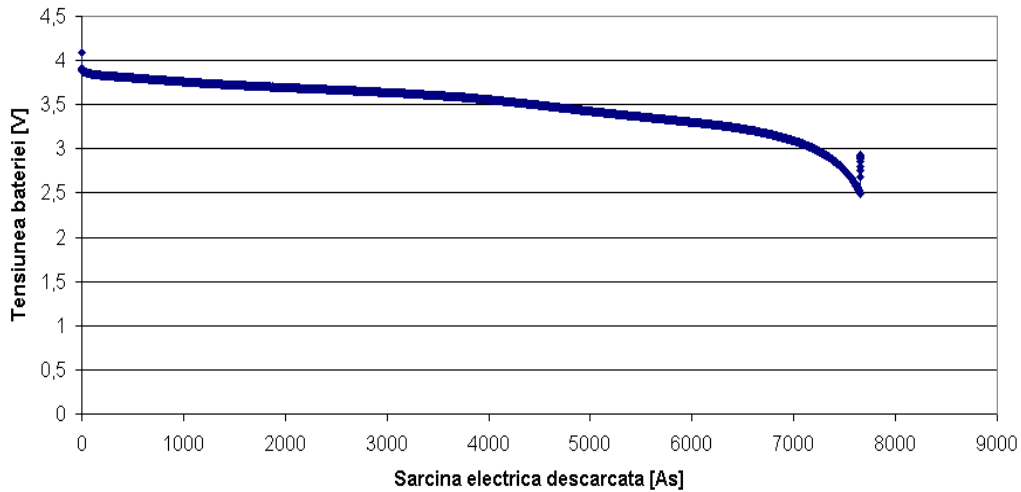


Fig. 4.45 Curba de descărcare cu curent constant 2 [A] pentru o celulă la temperatura 10°C

Sucesiunea de stări prin care trece bateria în timpul testului de descărcare se poate vedea în **Fig. 4.46**:

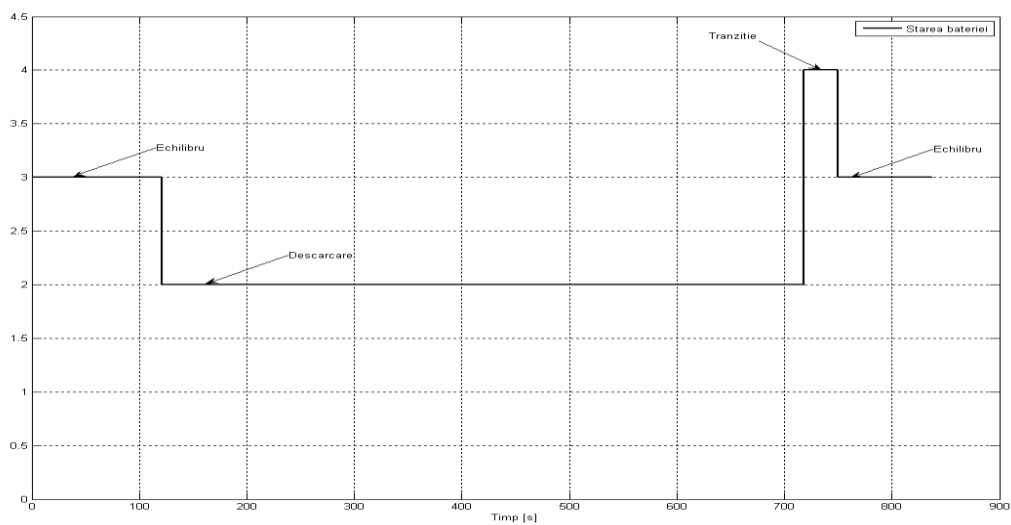


Fig. 4.46 Succesiunea stărilor prin care trece bateria în timpul descărcării cu curent constant 2[A] la temperatura 10°C

Starea de încărcare a bateriei SOC se determină înainte de începerea descărcării cu ajutorul tensiunii de mers în gol a acesteia, apoi, în timpul descărcării, cu ajutorul contorului amperi-oră care integrează în timp valoarea curentului descărcat din baterie. După ce s-a terminat descărcarea bateriei și s-a ajuns în stare de echilibru estimarea stării de încărcare se face din nou măsurând tensiunea de mers în gol a bateriei.

La temperatura de 25°C s-a descărcat bateria timp de 20 minute (1200 [s]), cantitatea de sarcină electrică descărcată din baterie este de 2400 [As] sau 666.7 [mAh], adică 31% din capacitatea maximă a bateriei. Datele măsurate în timpul testului de descărcare sunt prezentate în **Fig. 4.47**:

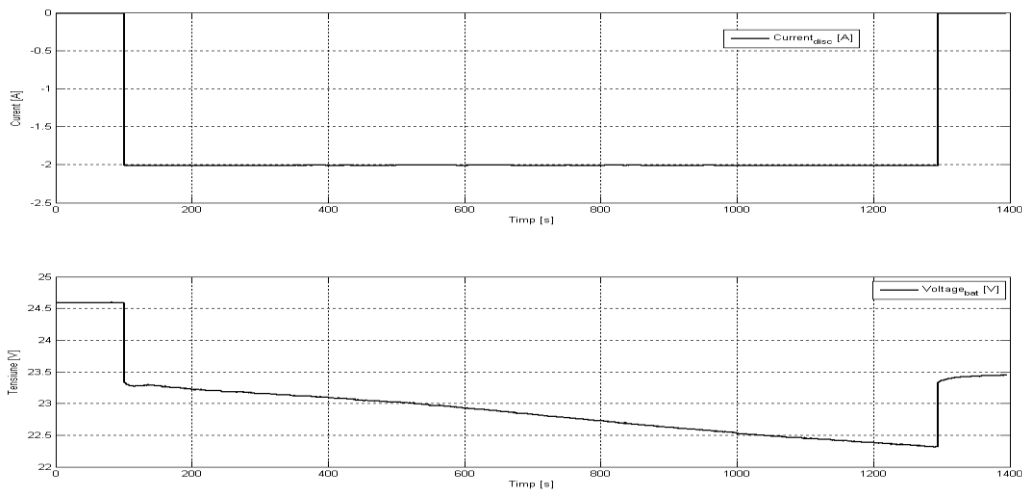


Fig. 4.47 Tensiunea și curentul bateriei în timpul descărcării controlate a acesteia la temperatura 25°C

Parametrii bateriei estimați de algoritm pentru aceste date de intrare sunt prezentați în **Fig. 4.48**:

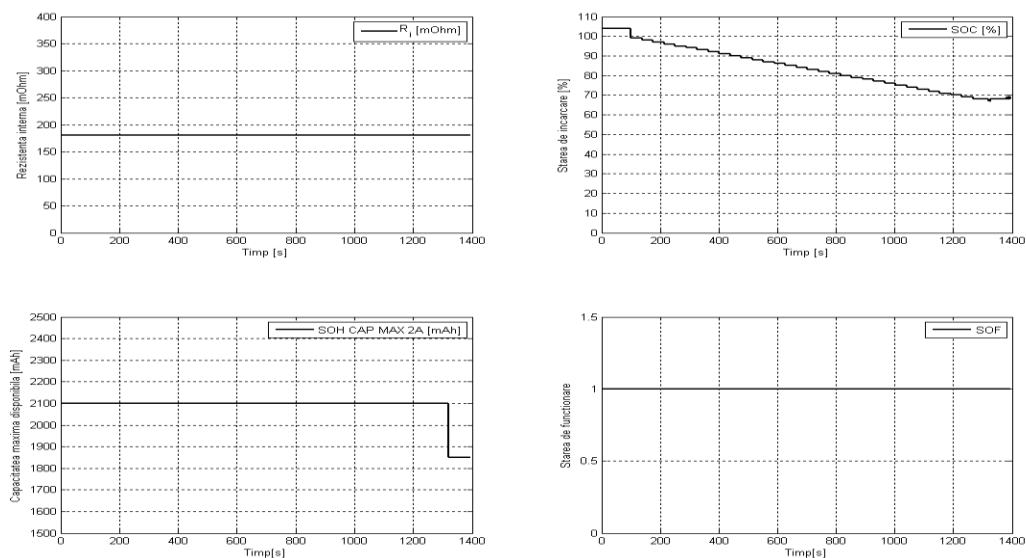


Fig. 4.48 Parametrii estimați ai bateriei în urma testului de descărcare controlată a acesteia cu curent constant de 2 [A] la temperatura 25°C

Capacitatea maximă utilă a bateriei estimată în urma acestui test este mai mică decât cea măsurată, chiar dacă timpul de descărcare a fost dublat, de la 10 minute la 20 minute și deci sarcina descărcată din baterie a fost mai mare. Ca și în cazul testului de descărcare efectuat la temperatura de 10°C o posibilă cauză ar fi timpul scurt (aprox. 120secunde) trecut de la terminarea descărcării și până când s-a citit tensiunea de la bornele bateriei. Deoarece variația tensiunii de la bornele bateriei după încetarea descărcării este lentă, algoritmul decide că bateria a atins starea de echilibru și determinarea capacității maxime a bateriei se face cu valoarea citită a tensiunii bateriei. Această valoare a tensiunii bateriei este mai mică decât tensiunea de echilibru a bateriei, deci valoarea stării de încărcare a bateriei determinată cu ajutorul tabelului de valori fixe este mai mică decât starea de încărcare reală a bateriei. Deci cantitatea de sarcină electrică descărcată din baterie corespunde unei diferențe mai mari a stării de încărcare a bateriei decât în realitate, cantitatea de sarcină electrică utilă maximă calculată cu relația (3.8) rezultând mai mică.

În **Fig. 4.49** de mai jos se poate observa că sarcina electrică totală descărcată din celulă în timpul testului este 7860 [As], adică 2180 [mAh].

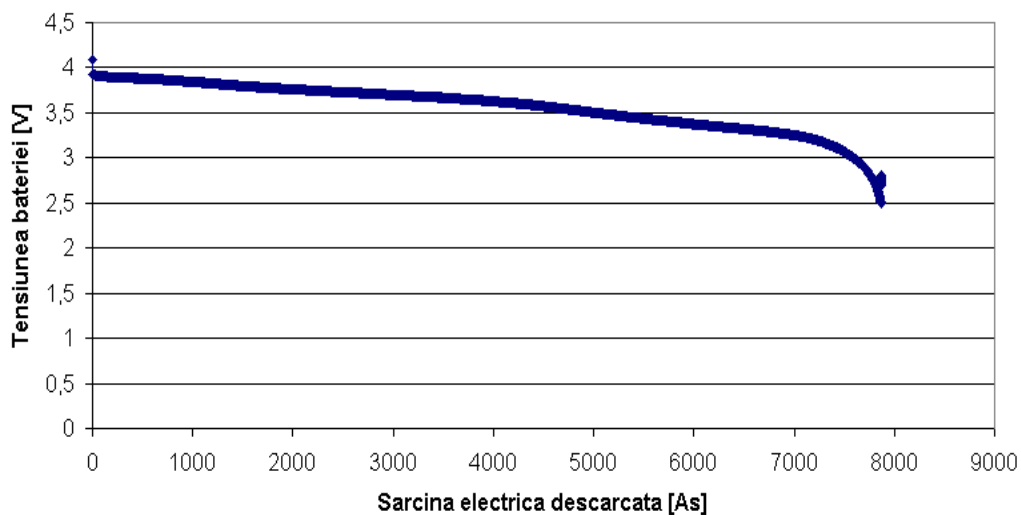


Fig. 4.49 Curba de descărcare cu curent constant 2 [A] pentru o celulă la temperatura 25°C

La temperatura de 40°C s-a repetat scenariul de testare cu 20 minute timp de descărcare a bateriei cu curent constant. Datele măsurate în timpul testului de descărcare sunt prezentate în **Fig. 4.50**:

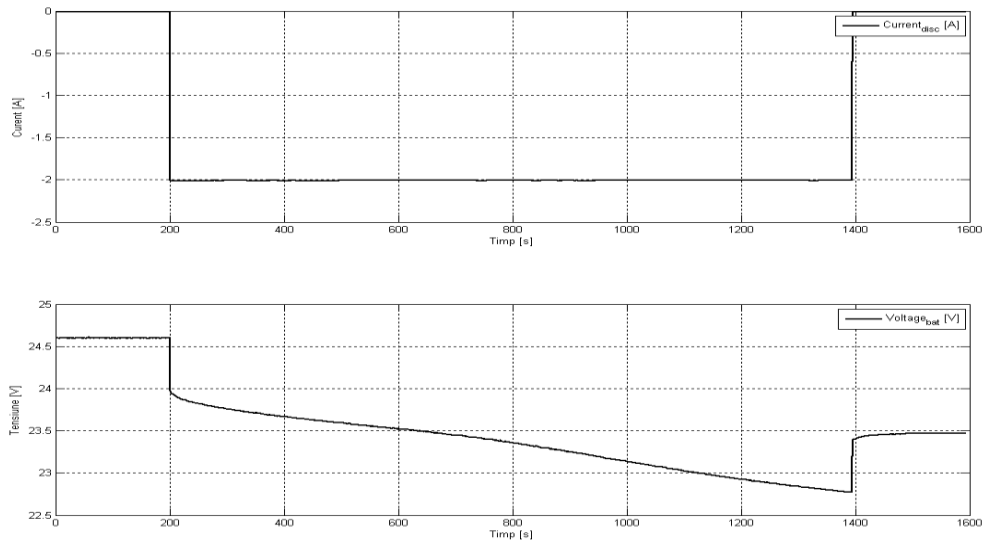


Fig. 4.50 Tensiunea și curentul bateriei în timpul descărcării controlate a acesteia la temperatura 40°C

Pe baza datelor măsurate algoritmul calculează parametrii bateriei prezentați în **Fig. 4.51** de mai jos:

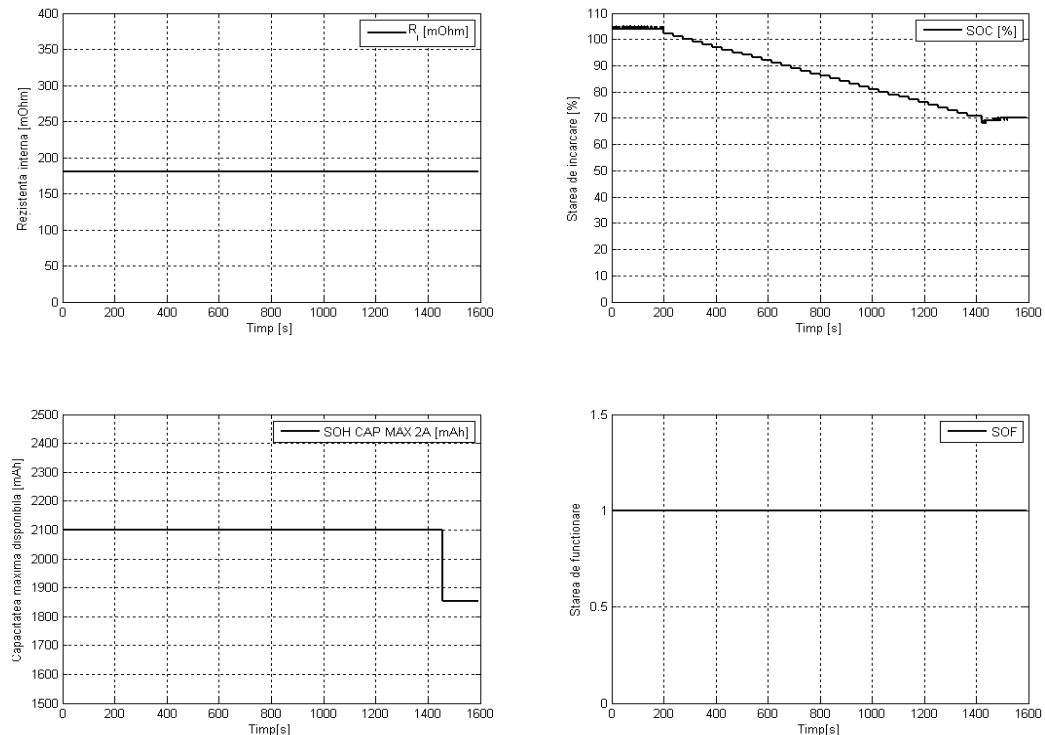


Fig. 4.51 Parametrii estimați ai bateriei în urma testului de descărcare controlată a acesteia cu curent constant de 2 [A] la temperatura 40°C

122 Testarea algoritmului de diagnosticare și validarea experimentală – 4.

De asemenea, se observă în parametrii calculați că valoarea estimată a capacității maxime utile a bateriei este mai mică decât cea determinată experimental. Timpul de descărcare mai mare prescris pentru aceste teste nu a dus la mărirea preciziei de estimare a cantității de sarcină maximă utilă a bateriei.

În continuare s-a efectuat un alt test de descărcare controlată a bateriei la temperatura de 40°C cu curent constant de 2 [A] timp de 10 minute, iar după terminarea descărcării s-a așteptat 10 minute și apoi s-a măsurat tensiunea bateriei. Datele măsurate în timpul testului de descărcare sunt prezentate în **Fig. 4.52**:

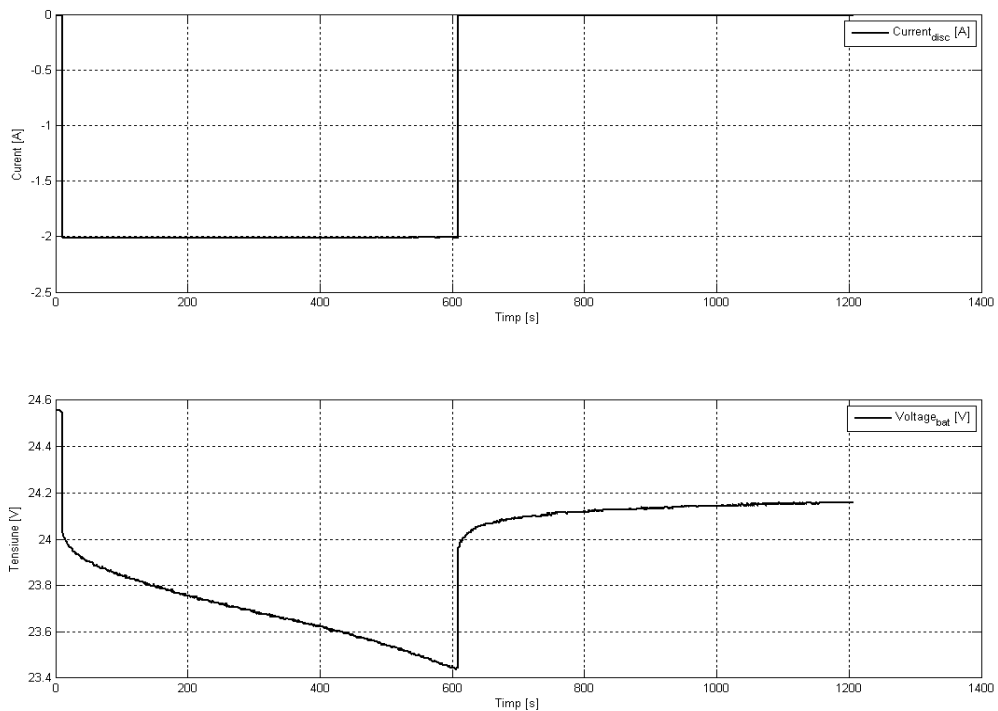


Fig. 4.52 Tensiunea și curentul bateriei în timpul descărcării controlate a acesteia la temperatura 40°C

Pe baza datelor măsurate algoritmul calculează parametrii din **Fig. 4.53** de mai jos:

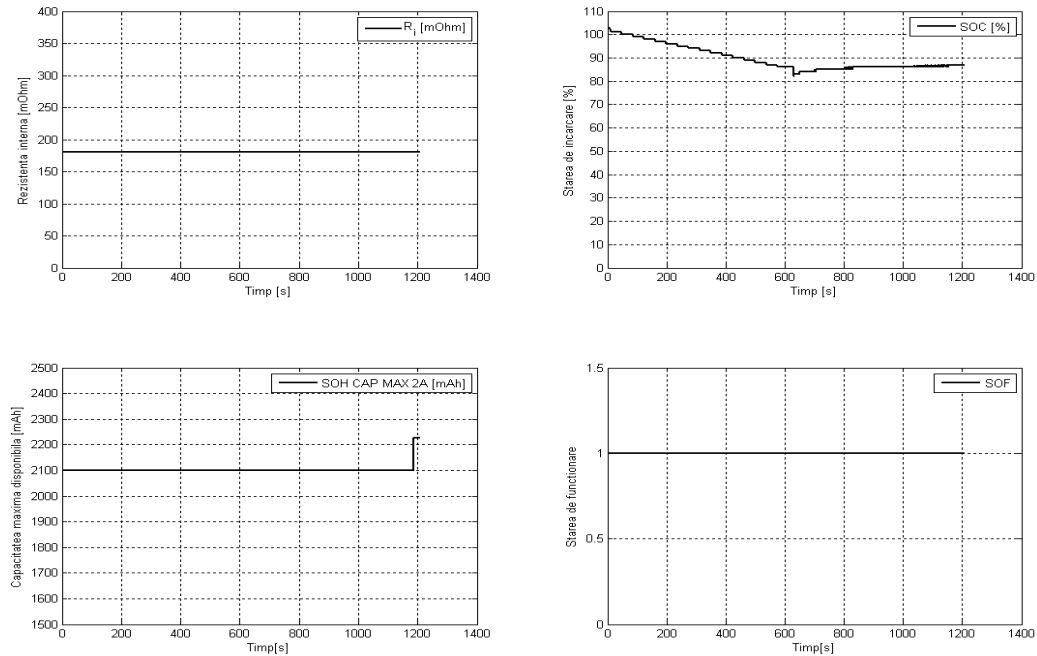


Fig. 4.53 Parametrii estimați ai bateriei în urma testului de descărcare controlată a acesteia cu curent constant de 2 [A] la temperatura 40°C

Cantitatea de sarcină electrică utilă maximă a bateriei a fost estimată de algoritm la aproximativ 2200 [mAh], o valoare mult mai apropiată de valoarea determinată experimental pentru temperatura de 40°C. În **Fig. 4.54** de mai jos se poate observa că sarcina electrică totală descărcată din celulă în timpul testului este 8100 [As], adică 2250 [mAh].

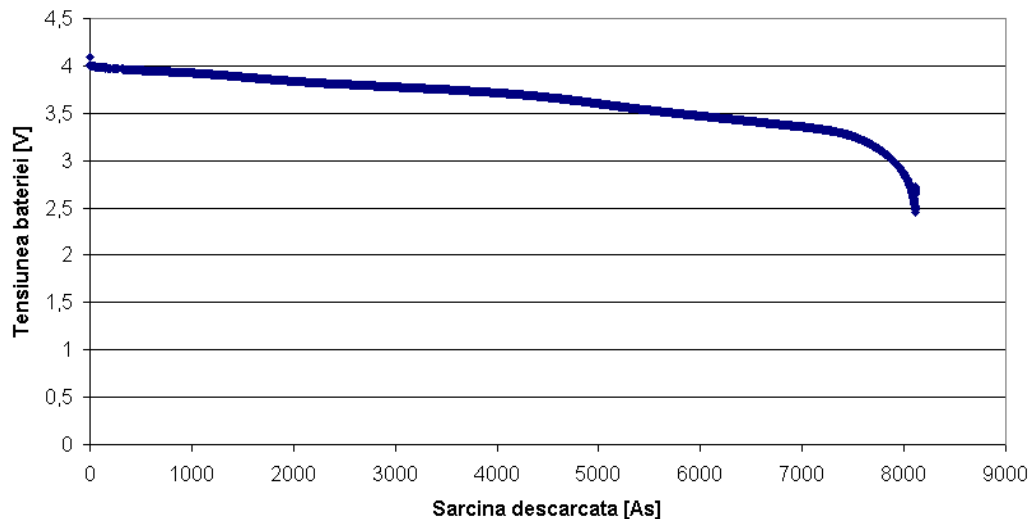


Fig. 4.54 Curba de descărcare cu curent constant 2 [A] pentru o celulă la temperatura 40°C

124 Testarea algoritmului de diagnosticare și validarea experimentală – 4.

Pentru temperatura de 55°C s-a optat pentru această soluție, descărcarea bateriei timp de 10 minute apoi măsurarea tensiunii la bornele acesteia după 10 minute de la terminarea descărcării. Datele măsurate în timpul testului de descărcare sunt prezentate în **Fig. 4.55**:

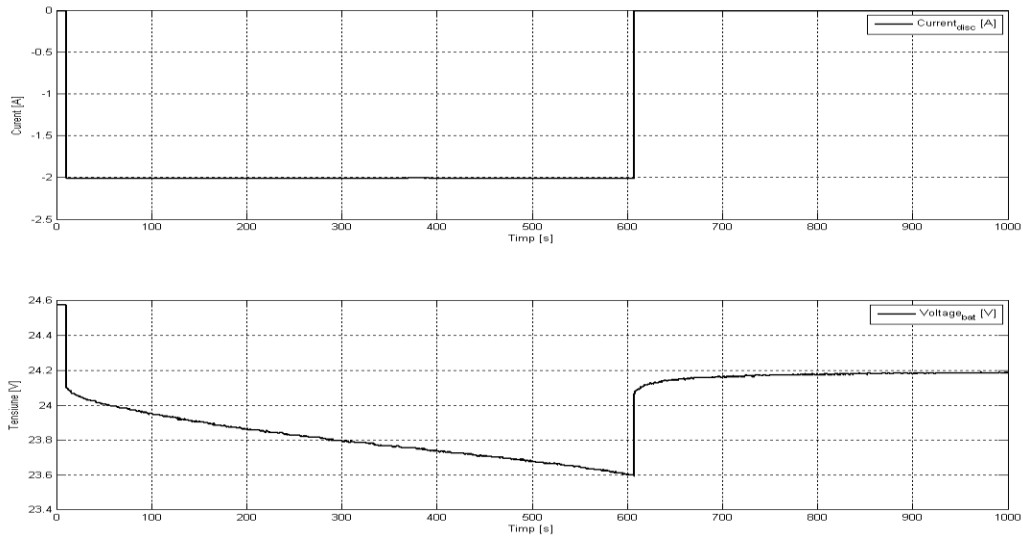


Fig. 4.55 Tensiunea și curentul bateriei în timpul descărcării controlate a acesteia la temperatura 55°C

Pe baza datelor măsurate algoritmul calculează parametrii din **Fig. 4.56** de mai jos:

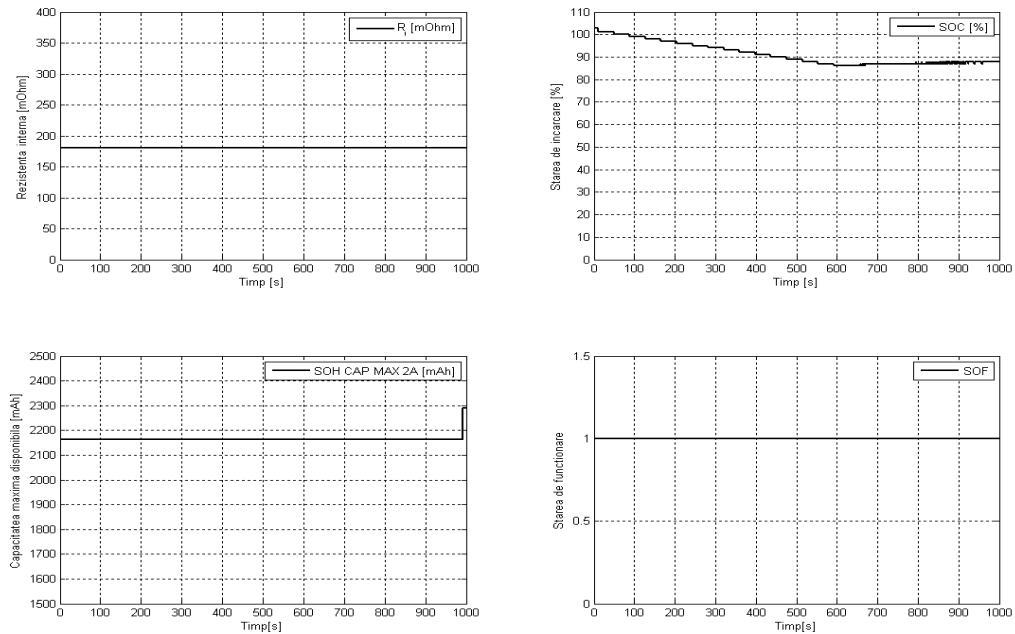


Fig. 4.56 Parametrii estimați ai bateriei în urma testului de descărcare controlată a acesteia cu curent constant de 2 [A] la temperatura 55°C

Cantitatea de sarcină utilă maximă din baterie a fost estimată în acest caz la aproximativ 2300 [mAh]. Datele experimentale corespunzătoare testului de descărcare a bateriei cu curent constant 2 [A] la temperatura 55°C sunt prezentate în **Fig. 4.57**:

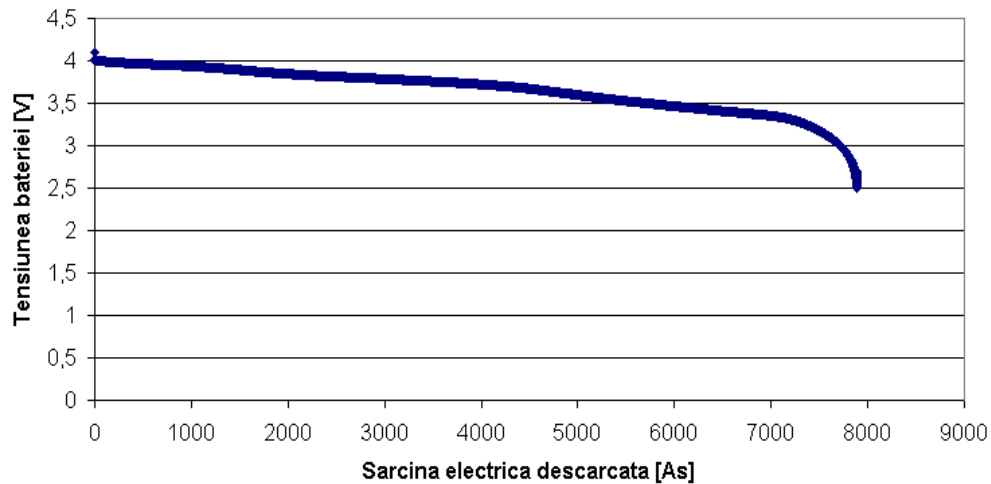


Fig. 4.57 Curba de descărcare cu curent constant 2 [A] pentru o celulă la temperatura 40°C.

La temperatura de 55°C sarcina totală descărcată din baterie este aproximativ 8000 [As], adică 2230 [mAh], aproximativ aceeași cu cea de la 40°C.

Tab. 4.4 Comparație între valorile experimentale obținute pentru capacitatea maximă utilă și valorile estimate de algoritmul de diagnosticare, pentru diferite temperaturi, curentul de descărcare 2[A]

Temperatura[°C]	Cantitate sarcină utilă maximă- experimental [mAh]	Cantitate sarcină utilă maximă - estimată [mAh]	Eroare [%]
10	2100	1900	9.5
25	2180	1850	15.1
40	2250	2230	0.9
55	2230	2300	3.1

Comparând datele obținute prin simulare cu rezultatele experimentale (vezi tabelul 4.4), pentru aceleași condiții de descărcare, se pot trage câteva concluzii:

- timpul trecut din momentul încetării descărcării până în momentul în care se citește valoarea tensiunii de mers în gol a bateriei influențează valoarea estimată a capacității maxime a bateriei.

- în timpul testelor de descărcare completă a bateriilor temperatura acestora crește, acest fapt fiind o explicație a valorilor mai mari obținute pentru capacitatea maximă utilă a bateriei decât cele estimate cu ajutorul algoritmului, acest lucru observându-se mai accentuat la temperaturile 10°C și 25°C (pentru aceste

temperaturi valoarea rezistenței interne a bateriei este mai mare, deci pierderile de putere pe această rezistență internă (care apoi se transformă în căldură) sunt mai mari.

- această metodă de estimare a capacității maxime disponibile a bateriei este utilă și poate fi folosită în algoritmul de diagnosticare, cu rezultate cu atât mai bune cu cât temperatura la care se face această probă de descărcare controlată este mai ridicată și timpul de așteptare după terminarea descărcării este mai mare. S-a observat din forma curbelor tensiunii la bornele bateriei că tensiunea de revenire ia valoarea corespunzătoare stării de echilibru mai repede dacă temperatura este mai ridicată (40°C, 55°C), și deci estimarea capacității maxime utile a bateriei făcute de algoritm este mai precisă.

- cantitatea minim necesară de sarcină electrică utilă în baterie este, conform celor prezentate în cap. 3, paragraful.3.2.3, cantitatea de sarcină electrică necesară acționării consecutive de 5 ori a sistemului de frânare. Pentru un ciclu de frânare cantitatea de sarcină electrică necesară este de 260 [As] sau 72 [mAh], deci pentru 5 acționări consecutive avem nevoie de o cantitate minimă de sarcină electrică în baterie de $5 \cdot 72 = 360$ [mAh], ceea ce reprezintă aproximativ 17% din sarcina utilă maximă a bateriei (2100 [mAh]).

4.4 Concluzii

În acest capitol s-a făcut verificarea experimentală a algoritmului de diagnosticare prezentat în capitolul 3. În acest scop s-au conceput testele și s-au elaborat schemele de măsurare utilizate în timpul testelor. Cu ajutorul programului LabView s-au realizat instrumentele virtuale pentru comanda și achiziția datelor de la baterii.

Pentru toate temperaturile luate în considerare algoritmul calculează / estimează în timp real, în mod corect, parametrii bateriei care s-au considerat esențiali pentru aplicația de frână electrică alimentată de la baterie: starea de încărcare momentană a bateriei, rezistența internă după 500 [ms] de la aplicarea curentului de descărcare, capacitatea maximă utilă a bateriei. Prin intermediul tabelelor de valori fixe algoritmul adaptează valorile obținute pentru diferite temperaturi la care funcționează bateriile, astfel că algoritmul estimează și comportarea bateriilor la temperaturi diferite de cele la care se face determinarea (pentru temperatura -10°C). Tot pe baza tabelelor de valori fixe algoritmul estimează valorile rezistenței pentru curenți diferiți față de cei de test (testul se face cu 7 [A] și se estimează rezistența pentru 23 [A]);

Analizând cei doi parametri care exprimă starea de sănătate a bateriei: rezistența internă și capacitatea maximă utilă și ținând cont de caracteristicile și cerințele aplicației alimentate de la baterie se poate trage concluzia că parametrul critic pentru baterie este valoarea rezistenței interne pentru diferite temperaturi la care aceasta operează. Este puțin probabil ca bateria să nu mai poată furniza, datorită îmbătrânirii, cantitatea de sarcină electrică necesară pentru 5 cicluri de frânare, 360 [mAh], adică 16-17% din capacitatea ei maximă și rezistența ei internă să fie sub limita maximă admisă la temperatura de funcționare a acesteia.

5. Cercetări teoretice și experimentale privind comportamentul termic al bateriilor de tip Li-ion

5.1 Introducere

După cum s-a văzut și din rezultatele testelor prezentate în paragraful 3.2.2, performanțele bateriilor de tip Li-ion sunt puternic influențate de temperatura mediului în care acestea funcționează. Pe de altă parte, comportarea acestora din punct de vedere termic este influențată de reacțiile chimice și electrochimice care au loc în interiorul bateriilor în timpul proceselor de încărcare și de descărcare [5.1].

Pentru temperaturi joase (sub 0°C) dinamica reacțiilor electrochimice din interiorul bateriei este scăzută, aceasta reflectându-se în valori ridicate ale rezistenței interne a bateriilor. O rezistență internă ridicată a bateriei diminuează capacitatea acesteia de a furniza putere aplicației pe care o alimentează.

La temperaturi ridicate (peste 60 °C) producătorul avertizează cu privire la accelerarea proceselor de îmbătrânire ale bateriilor, fapt care se va reflecta negativ în durata de viață a acestora și în performanțele viitoare, cu toate că valoarea rezistenței interne la această valoare a temperaturii este mică – vezi Fig.4.38, 4.39, 4.40, 4.41. Deci la momentul la care funcționează bateria la temperatura de 60°C performanțele acesteia sunt foarte bune: rezistență mică, pierderi interne reduse, energia furnizată de baterie este la parametrii ridicați, capacitatea acesteia de a furniza putere aplicației este ridicată.

În continuare se vor studia două situații întâlnite în timpul funcționării bateriilor: **încălzirea** bateriilor Li-ion 26650 **din exterior** folosind dispozitive suplimentare de încălzire pentru temperaturi ale mediului ambiant sub 0°C în scopul aducerii lor în stare de funcționare în cel mai scurt timp fără a le afecta durata de viață și **autoîncălzirea** acestora în timpul descărcării lor cu diferiți curenți de descărcare și la diferite temperaturi ale mediului ambiant.

5.2 Managementul termic al bateriilor de tip Li-ion 26650 în medii cu temperaturi scăzute

Sub temperatura de -20 °C bateria de tip Li-ion Sony 26650 nu este capabilă să furnizeze curent, iar profilul de curent corespunzător ciclurilor de frânare (curent maxim 23 [A]) poate fi furnizat de această baterie dacă temperatura ei este de cel puțin -15 °C. Având în vedere faptul că domeniul de temperatură pentru aplicațiile din industria auto începe la temperatura de -40 °C, pentru acest tip de baterii trebuie conceput un sistem de management termic care să asigure aducerea acestora în stare de funcționare în cel mai scurt timp. Pe de altă parte, producătorul precizează că o temperatură de stocare sau de funcționare a bateriilor peste 60 °C

duce la îmbătrânirea accelerată a acestora, cu consecințe defavorabile asupra duratei de viață și performanțelor bateriilor pe termen lung [5.3].

Cerințele care trebuie să fie îndeplinite de un sistem de management termic al bateriilor de rezervă de tip Li-ion sunt după cum urmează [5.8]:

- să încălzească bateria de la temperatura de $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ (limita minimă) până la o temperatură la care bateria este în stare să furnizeze curentul corespunzător ciclurilor de frânare în 2 minute;
- să utilizeze elemente pentru reglarea temperaturii pentru a evita supraîncălzirea bateriilor;
- să asigure o distribuție de temperatură omogenă pe suprafața bateriilor pentru a evita apariția punctelor fierbinți care ar putea duce la accelerarea îmbătrânirii bateriilor;
- să fie prevăzută cu elemente electronice care activează sistemul de încălzire al bateriilor la temperaturi scăzute și îl deconectează când temperatura crește peste $10\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- să asigure alimentarea sistemului de încălzire prin sistemul electric al mașinii, de la bateria cu plumb a acesteia.

Ținând cont și de caracteristicile întregului sistem de frânare, s-a ales soluția unui sistem de încălzire care utilizează folii încălzitoare – vezi **Fig. 5.1**:

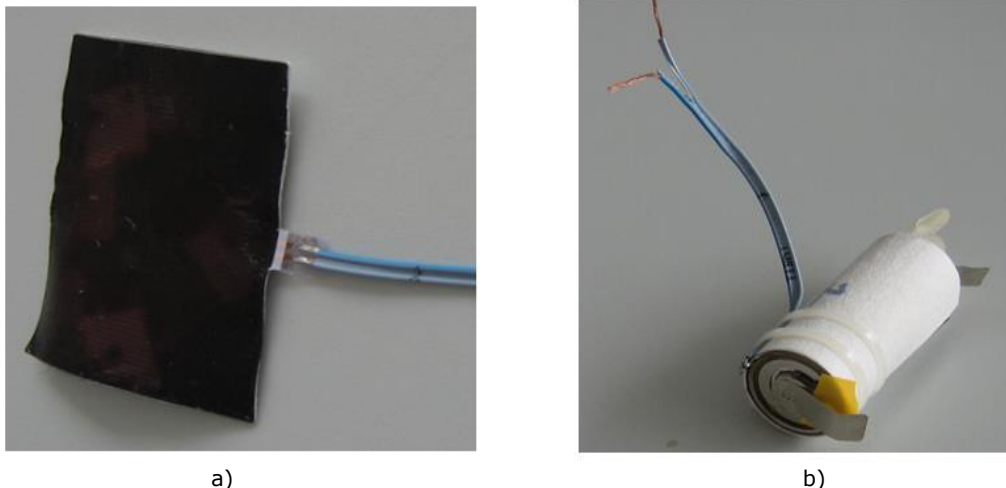


Fig. 5.1 a) Folie încălzitoare pentru o celulă b) Celulă Li-ion Sony 26650 echipată cu folie încălzitoare

Foliile încălzitoare sunt alimentate de la bateria mașinii, cea cu plumb, la tensiunea 12 [V] și sunt astfel proiectate și realizate ca temperatura pe toată suprafața acestora să fie uniformă în timpul funcționării.

5.2.1 Considerații teoretice

O celulă de tip Li-ion arată în principiu conform Fig. 1.6 prezentată în capitolul 1: straturi subțiri ale catodului, separatorului și anodului sunt rulate în jurul unui ax central, introduse apoi într-o carcasă cilindrică și apoi spațiul rămas e umplut cu electrolit. Având în vedere construcția celulei și soluția aleasă pentru încălzirea acesteia – folie încălzitoare care îmbracă suprafața laterală a celulei, așa cum se poate vedea și în **Fig.5.1**, ecuațiile care descriu modul de transmitere a căldurii în

interiorul celulei și cu ajutorul cărora se poate afla distribuția câmpului termic în interiorul celulei trebuie adaptate la particularitățile ansamblului folie încălzitoare – celulă Li-ion. Ecuația Fourier care descrie procesul de încălzire al celulei este (5.1) [5.2]:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = a * \Delta \theta \quad (5.1)$$

Unde: $a = \frac{\lambda}{\rho * c} \left[\frac{m^2}{s} \right]$ - coeficient global de difuzie termică [5.2];

$\lambda \left[\frac{W}{m * grd} \right]$ - conductivitatea termică globală a celulei;

$\rho \left[\frac{kg}{m^3} \right]$ - densitatea globală a celulei;

$c \left[\frac{J}{kg * grd} \right]$ - căldura specifică globală a celulei;

Pentru corpuri care au forme cilindrice ecuația Fourier (5.1) devine [5.2]:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = a \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \theta}{\partial r} \right) \quad (5.2)$$

Unde r înseamnă raza celulei, t timpul și θ temperatura.

Pentru rezolvarea ecuației (5.2) și determinarea evoluției în timp și spațiu a temperaturii celulei este necesar să se cunoască date și condiții suplimentare, cum ar fi:

Condițiile inițiale pentru procesul de încălzire a celulei: temperatura inițială în toate punctele celulei este constantă și egală cu temperatura de la suprafața celulei.

Condițiile de frontieră pentru procesul de încălzire a celulei: temperatura suprafeței celulei este cunoscută pe toată durata procesului de încălzire:

$$\theta_s = \theta_s(t) \quad (5.3)$$

Pentru rezolvarea ecuației (5.2) se vor folosi metode numerice, și anume metoda diferențelor finite. Pentru a putea aplica această metodă mai întâi trebuie stabilită rețeaua de discretizare. Aceasta se stabilește ținând cont de geometria celulei, de ipotezele simplificatoare și soluția aleasă pentru încălzirea celuleor. În **Fig. 5.2** este prezentată rețeaua de discretizare aleasă pentru secțiunea circulară a celulei: sectoare cilindrice concentrice, fiecare sector având 1 mm grosime și înălțimea celulei, 65 mm. În total vom avea 13 sectoare circulare.

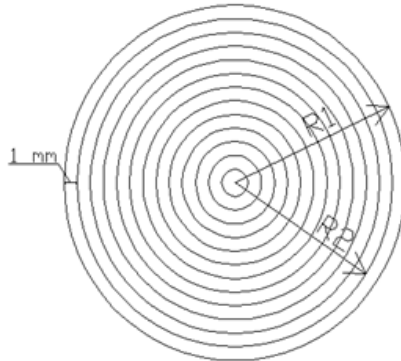


Fig.5.2 Rețeaua de discretizare pentru secțiunea circulară transversală a celulei

Alte ipoteze simplificatoare sunt: în interior celula se consideră omogenă, adică datele de material sunt aceleași în toate punctele din interiorul acesteia. De asemenea, temperatura de-a lungul înălțimii bateriei se consideră constantă pentru aceeași rază, temperatura depinzând de momentul de timp pe durata procesului de încălzire $\theta(r,t)$. Temperatura fiecărui strat se consideră omogenă pe toată grosimea stratului respectiv.

Având în vedere aceste date, pentru partea stângă a relației (5.2) se poate scrie:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\theta^{(k)} - \theta^{(k-1)}}{t_k - t_{k-1}} \quad (5.3)$$

Unde: $\Delta t = t_k - t_{k-1}$ - pasul de timp = 1[s];

$\theta^{(k)}$ - valoarea temperaturii la momentul actual de timp;

$\theta^{(k-1)}$ - valoarea temperaturii la momentul de timp precedent;

Pentru partea dreaptă a relației (5.2) se poate scrie:

$$\frac{\partial \theta}{\partial r} = \frac{\theta_{i-1} - \theta_i}{r_{i-1} - r_i}, \quad i=1 \dots 13 \quad (5.4)$$

$\Delta r = r_{i-1} - r_i$ - pasul de discretizare spațială = 1[mm];

θ_i - temperatura în punctul i al secțiunii;

θ_{i-1} - temperatura în punctul $i-1$ al secțiunii;

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial r^2} = \frac{\theta_{i-2} - 2 * \theta_{i-1} + \theta_i}{\Delta r^2} \quad (5.5)$$

Înlocuind în relația (5.2) se obține:

$$\frac{\theta_i^{(k)} - \theta_i^{(k-1)}}{\Delta t} = a * \frac{\theta_{i-2}^{(k)} - 2 * \theta_{i-1}^{(k)} + \theta_i^{(k)}}{\Delta r^2} + \frac{1}{r_i} * \frac{\theta_{i-1}^{(k)} - \theta_i^{(k)}}{\Delta r} \quad (5.6)$$

De unde rezultă ecuația pentru aflarea temperaturii în punctul i la actualul moment de timp, k :

$$\theta_i^{(k)} = \frac{1}{1 - a * \Delta t * \frac{r_i - \Delta r}{r_i * \Delta r^2}} * \left[\theta_i^{(k-1)} + \frac{a * \Delta t}{r_i * \Delta r^2} \left(\theta_{i-2}^{(k)} * r_i - \theta_{i-1}^{(k)} * (2 * r_i - \Delta r) \right) \right] \quad (5.7)$$

Datele de material – oferite de către producător - pentru celula de tip Li-ion Sony 26650 sunt după cum urmează :

- densitate globală: $\rho = 2.593 * 10^3 [\text{kg}/\text{m}^3]$;
- căldură specifică globală: $c = 900 [\text{J}/\text{kg} * \text{grad}]$;
- conductivitate termică globală: $\lambda = 0.575 [\text{W}/\text{m} * \text{grad}]$;
- masa celulei: $m = 89.5 [\text{g}]$;

Cunoscând și datele geometrice: raza celulei = 13 [mm] și înălțimea = 65 [mm], se calculează volumul și masa fiecărui sector cu lățimea 1 [mm]. Volumul total al celulei:

$$V_{total} = \pi * R^2 * h = 3.14 * 169 * 65 = 34510.39 [\text{mm}^3] \quad (5.8)$$

Stratul 1:

$$R_1 = 13 [\text{mm}]; \quad R_2 = 12 [\text{mm}]$$

$$L_1 = 2 * \pi * R_1 = 81,68 [\text{mm}] \quad (5.9)$$

$$L_2 = 2 * \pi * R_2 = 75,39 [\text{mm}] \quad (5.10)$$

$$A_1 = \frac{(L_1 + L_2) * h}{2} = \frac{(81,68 + 75,39) * 1}{2} = 78,53 [\text{mm}^2] \quad (5.11)$$

$$V_1 = A_1 * h = 78,53 * 65 = 5104,75 [\text{mm}^3] \quad (5.12)$$

$$m_1 = V_1 * \rho = 5102,5 * 0,00259 = 13,22 [\text{g}] \quad (5.13)$$

În mod similar se calculează masa și volumul fiecărui strat. Rezultatele calculelor s-au trecut în tabelul 5.1 de mai jos:

Tab.5.1 Volumul și masa fiecărui strat al rețelei de discretizare a celulei

Strat	Volum [mm ³]	Masa [g]	% din volumul total
1	5104,75	13.25	14.8
2	4694.3	12.15	13.6
3	4286.1	11.1	12.42
4	3877.9	10.02	11.24
5	3469.7	9	10.05
6	3061.5	7.95	8.87
7	2653.3	6.9	7.7
8	2245.1	5.85	6.5
9	1836.9	4.75	5.32
10	1428.7	3.7	4.14
11	1020.5	2.65	2.95
12	629.2	1.65	1.82
13	204.1	0.53	0.59

5.2.2 Modelarea termică a unei celule de tip Li-ion 26650

Cu datele geometrice din Tabelul.5.1, datele de material cunoscute – valori globale – și condițiile inițiale și de frontieră mai sus amintite se poate calcula distribuția câmpului termic în interiorul celulei la fiecare moment de timp pe toată durata procesului de încălzire a celulei. Pentru a realiza acest calcul s-a folosit programul Matlab/Simulink cu biblioteca de componente Simscape. Un sector al celulei de grosime 1 [mm] a fost modelat, cu ajutorul elementelor existente în această bibliotecă după cum se poate vedea în **Fig. 5.3**:

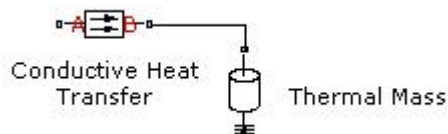


Fig.5.3 Modelarea din punct de vedere termic a unui strat al celulei

Conductive Heat Transfer – este elementul care modelează transferul termic prin conducție prin stratul de grosime 1 [mm];

Thermal Mass – este elementul care modelează încălzirea, acumularea de căldură în stratul de grosime 1 [mm];

Vom avea astfel modelat procesul termic de încălzire a întregii celule cu 13 astfel de circuite termice inseriate. Pentru temperatura fiecărui strat se folosesc elemente de măsurare a temperaturii, existente tot în această bibliotecă de componente, după cum se poate vedea în **Fig.5.4**:

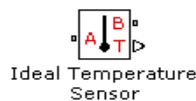


Fig. 5.4 Modelarea senzorului de temperatură

Condițiile de frontieră se cunosc, temperatura pe suprafața exterioară a celulei se măsoară cu ajutorul unui termocuplu pe toată durata procesului de încălzire. Aceste date măsurate se folosesc ca date de intrare pentru simularea comportării termice a celulei cu ajutorul modelului termic. De asemenea se cunosc condițiile inițiale: se consideră temperatura celulei uniformă în toate punctele din interior și egală cu temperatura de la momentul începerii încălzirii celulei. În timpul procesului de încălzire temperatura fiecărui strat se consideră constantă pe toată grosimea acestuia.

Modelul termic al întregii celule pentru simularea procesului de încălzire exterioară cu folie încălzitoare se poate vedea în **Fig. 5.5**, de mai jos:

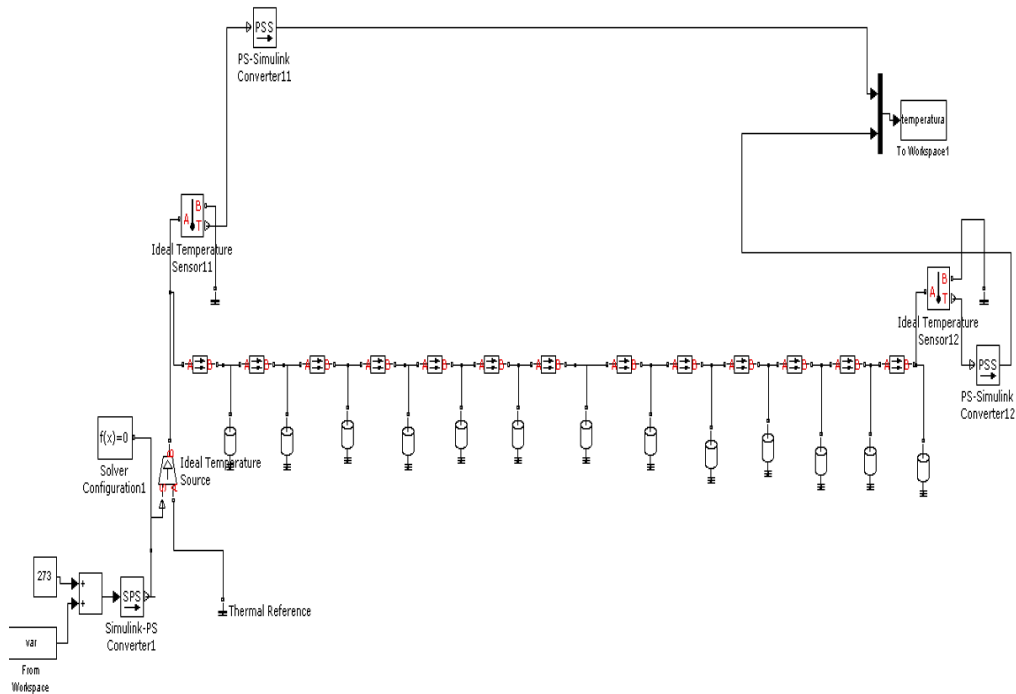
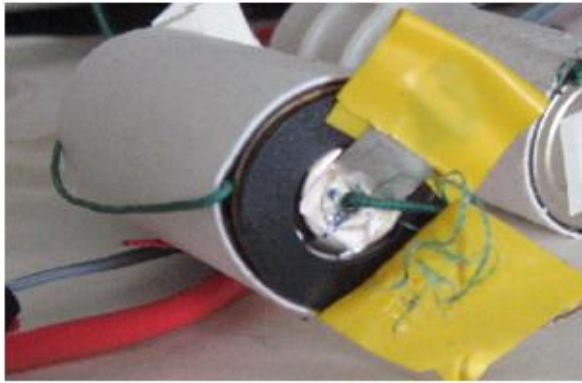


Fig. 5.5 Modelul termic pentru celula Li-ion Sony 26650

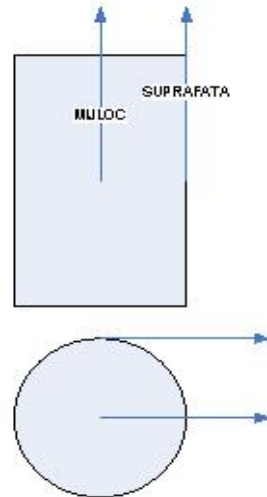
5.2.3 Validarea experimentală a modelului termic

Pentru a verifica datele obținute prin simulare am echipat o celulă de tip Li-ion Sony 26650 cu termocuple astfel: un termocuplu s-a fixat pe suprafața exterioară a celulei, între celulă și folia încălzitoare, iar cel de-al doilea termocuplu s-a introdus în celulă, mai precis s-a făcut o gaură longitudinală în axul celulei până la jumătatea înălțimii acesteia, cu un diametru de aproximativ 1 [mm] și s-a introdus termocuplul, astfel încât se poate măsura temperatura în mijlocul celulei. Celula echipată se poate vedea în **Fig. 5.6 a)** și schema explicativă pentru amplasarea termocuplelor în **Fig. 5.6 b)**:



a)

Fig. 5.6 a) Celulă Li-ion echipată cu termocuple;



b)

b) Schema amplasării termocuplelor pentru o celulă Li-ion

Astfel, avem acces atât la temperatura suprafeței celulei, cât și temperatura în centrul acesteia. Valorile de temperatură măsurate la suprafața celulei sunt folosite ca date de intrare pentru modelul termic propus. În urma rulării modelului se vor obține date calculate despre distribuția temperaturii în timpul procesului de încălzire, pentru fiecare strat în parte. Rezultatele obținute pentru stratul 13 – cel din mijloc – putând fi comparate cu datele măsurate de termocuplul din interiorul celulei.

Pentru verificarea modelului termic propus s-au făcut câteva teste de încălzire a celulei cu folii încălzitoare pornind de la temperatura de $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ (233K). Celula echipată cu folii încălzitoare și termocuple s-a introdus în camera termică Votsch VT4002 – vezi **Fig. 5.7** – și temperatura camerei s-a fixat la $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$. Celula a fost menținută la această temperatură până când temperatura în toată masa acesteia ajunge la $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$.



Fig. 5.7 Celule Li-ion cu folii încălzitoare introduse în camera termică Votsch VT 4002

Primul test constă în încălzirea bateriei cu ajutorul foliilor încălzitoare timp de 120 [s]. Se va măsura temperatura la suprafața celulei și în interiorul acesteia, datele sunt apoi comparate cu cele rezultate în urma simulării procesului de propagare a căldurii în interiorul celulei cu modelul termic prezentat anterior – vezi **Fig.5.5**.

Al doilea test constă în încălzirea celulei cu folii încălzitoare pornind de la aceeași valoare inițială a temperaturii $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$, până când temperatura la suprafața celulei atinge valoarea de $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ – valoarea maxim admisibilă precizată de producător. Se vor compara datele experimentale cu cele simulate cu ajutorul modelului termic.

Graficele corespunzătoare rezultatelor celor două teste sunt prezentate în **Fig. 5.8** și **5.9**, de mai jos:

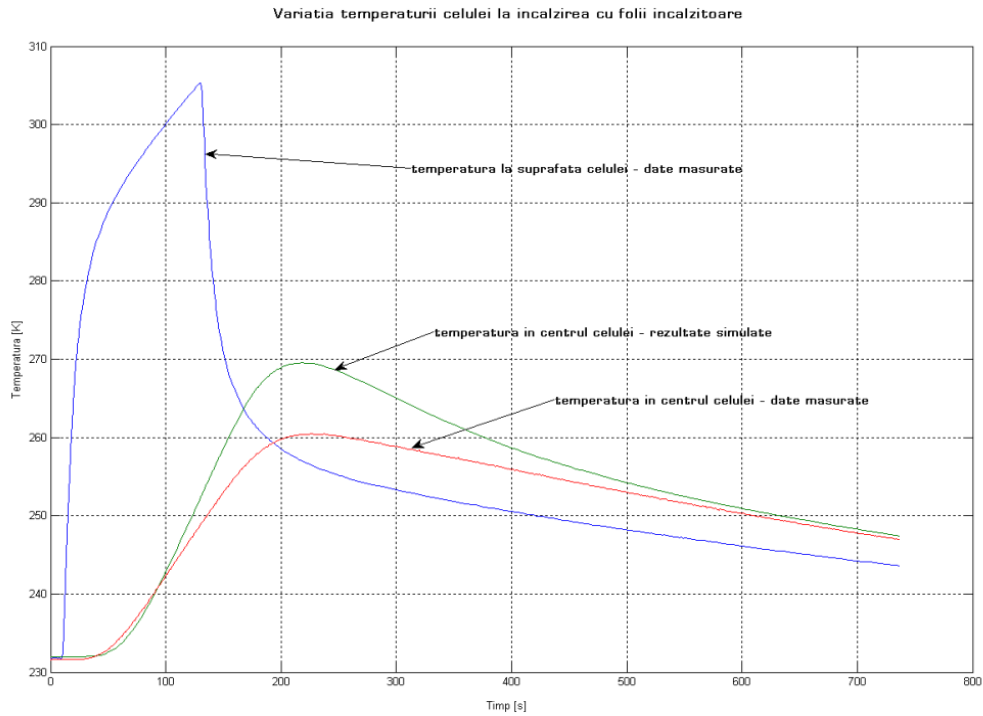


Fig. 5.8 Variația temperaturii de pe suprafața și din mijlocul celulei în timp – date măsurate și simulate pentru un timp de încălzire de 120 [s]

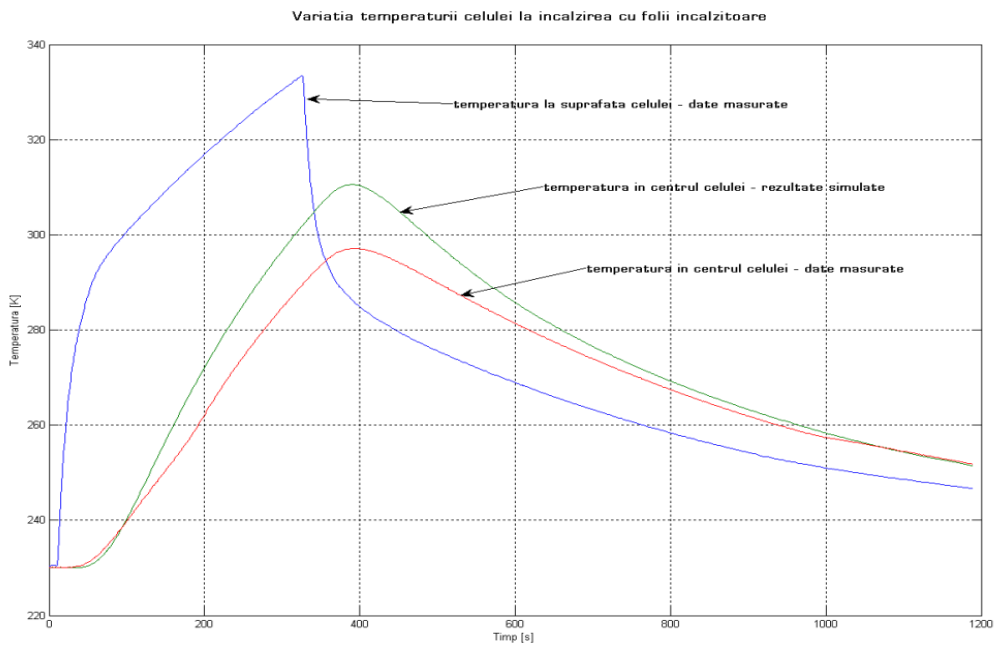


Fig. 5.9 Variația temperaturii de pe suprafața și din mijlocul celulei în timp – date măsurate și simulate – temperatura maximă pe suprafața celulei 60 °C

Din aceste grafice se poate vedea, în ambele cazuri, că rezultatele măsurate și cele simulate – pentru temperatura din mijlocul celulei sunt foarte apropiate, constantele de timp și momentele când se atinge temperatura maximă practic coincid. Diferențele maxime se observă în ambele cazuri la valorile maxime ale temperaturii în interiorul celulei, valorile temperaturii măsurate fiind mai mici decât cele ale temperaturii calculate de către model. Acest lucru era de așteptat, întrucât pentru a se măsura temperatura în mijlocul celulei s-a practicat o gaură de-a lungul axului longitudinal al celulei până la mijlocul înălțimii acesteia pentru a se introduce termocuplul, deci temperatura în interior este influențată de cea din exterior, în realitate temperatura în mijlocul celulei fiind mai ridicată. Modelul termic nu ține cont de influența temperaturii exterioare asupra interiorului bateriei datorită modificării aduse acesteia pentru introducerea termocuplului.

În ambele cazuri se observă o întârziere între momentul de atingere a maximului temperaturii pe suprafața celulei față de atingerea maximului temperaturii în mijlocul celulei, și la rezultatele măsurate și cele simulate temperatura maximă se atinge practic în același timp.

În graficele din **Fig. 5.8** se observă că după 120 [s] de încălzire pornind de la $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$, suprafața celulei ajunge la temperatura de aproximativ $35\text{ }^{\circ}\text{C}$ iar în mijlocul celulei avem aproximativ $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$. Deoarece încălzirea bateriilor cu folii exterioare se realizează în scopul de a aduce bateriile în domeniul de temperatură care permite acestora funcționarea la parametri necesari aplicației alimentate, trebuie să se verifice dacă și după cât timp bateriile au ajuns în această situație.

Pentru a se verifica dacă după o astfel de încălzire cu folii încălzitoare, pornind de la temperatura inițială a celulei de $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$, bateria după 2 minute (120 s) poate furniza profilul de curent corespunzător ciclurilor de frânare, s-au introdus în camera termică două celule de tip Li-ion Sony 26650 echipate cu folii încălzitoare identice și s-au încălzit simultan, în aceleași condiții. Una dintre cele două celule a fost cea echipată cu termocuple pe suprafață și în interior, cealaltă este echipată cu un singur termocuplu, pe suprafața celulei între celulă și folia încălzitoare – cele două celule se pot vedea în **Fig. 5.7**. Celula care este echipată cu termocuplu în interior nu este funcțională, ea nu mai poate fi descărcată sau încărcată. Această celulă folosește doar pentru măsurarea temperaturii la suprafață și în interior, ca "martor" pentru cea de-a doua celulă: se presupune că fenomenele termice se produc identic în ambele celule dacă sunt supuse acelorași condiții de temperatură. S-a pornit de la temperatura de $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$, s-au încălzit ambele celule cu folii încălzitoare și după 2 minute s-a întrerupt procesul de încălzire – alimentarea foliilor încălzitoare – și s-a prescris descărcarea cu curent corespunzător ciclurilor de frânare din celula funcțională. S-a folosit schema de măsurare prezentată în **Fig. 4.1** și programe LabView pentru comanda sarcinii electronice și achiziția datelor de la baterie. Diagramele bloc ale instrumentului virtual folosit sunt prezentate în **Fig. 4.2, 4.3, 4.4 și 4.5**.

Curbele corespunzătoare descărcării bateriei în aceste condiții sunt prezentate în **Fig. 5.10**:

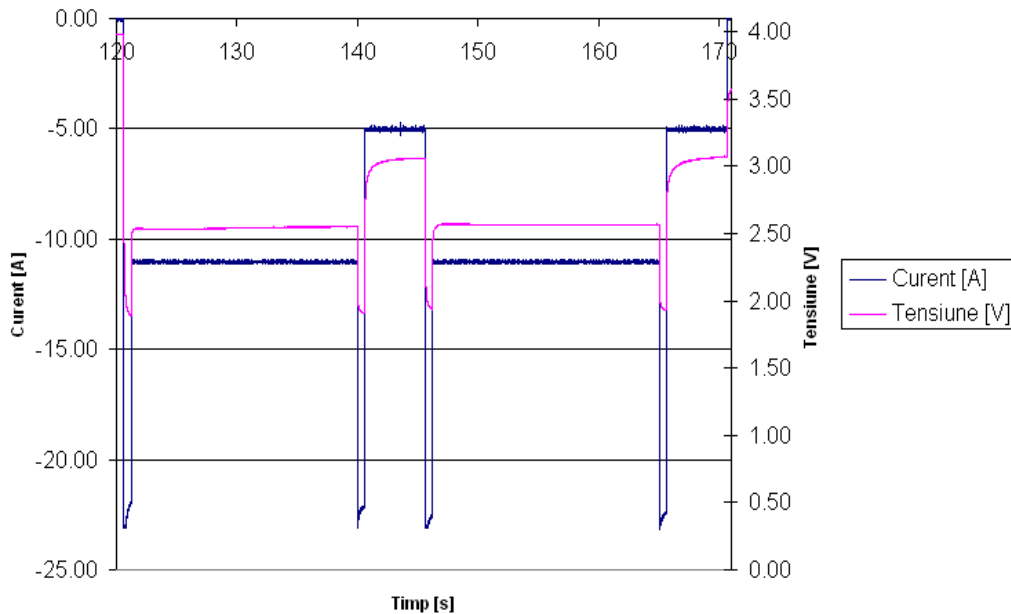


Fig. 5.10 Tensiunea și curentul bateriei în timpul descărcării cu curent corespunzător ciclurilor de frânare după timpul de încălzire de 120 [s] , temperatura inițială $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$

Din curbele prezentate în **Fig. 5.10** se observă că după aplicarea procedurii de încălzire cu folii încălzitoare pentru celulă pornind de la temperatura inițială de $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$, după 120 [s] descărcarea acesteia cu curent corespunzător ciclurilor de frânare nu este posibilă. Se observă că celula nu este capabilă să furnizeze curentul de descărcare maxim cerut -23 [A] – și în timpul descărcării cu curent maxim tensiunea la bornele unei celule scade sub 2 [V] .

Al doilea scenariu de testare s-a realizat tot cu cele două celule încălzite simultan cu folii încălzitoare, temperatura inițială fiind de $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$. În acest al doilea caz descărcarea cu curentul de descărcare corespunzător ciclurilor de frânare a început în momentul când în mijlocul celulei martor temperatura a atins $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ – temperatura minimă de funcționare precizată de către producător. Graficele pentru evoluția temperaturii în timp și pentru tensiunea și curentul bateriei se prezintă în **Fig. 5.11** și **Fig. 5.12** de mai jos:

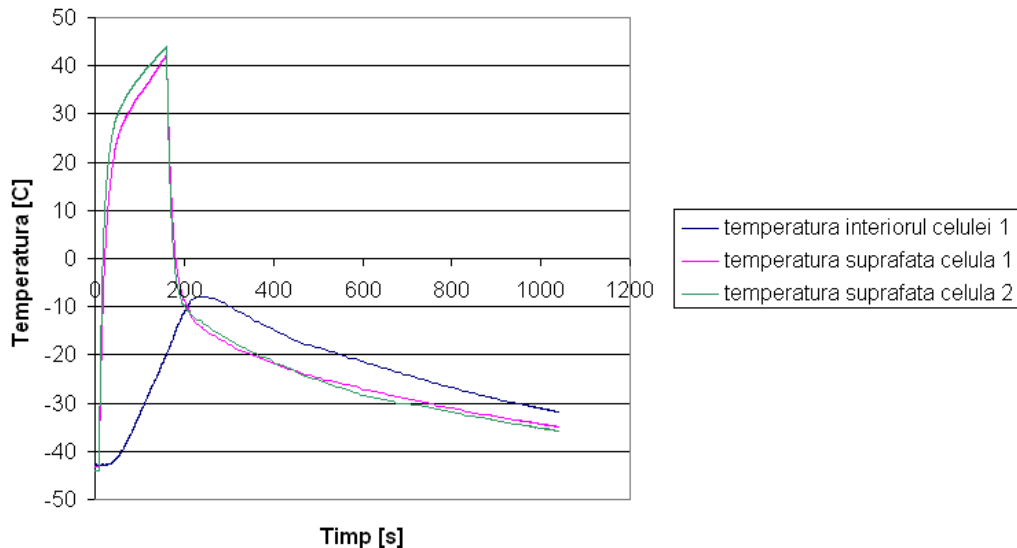


Fig. 5.11 Evoluția temperaturii în timp la încălzirea cu folii încălzitoare pentru două celule de tip Li-ion Sony 26650

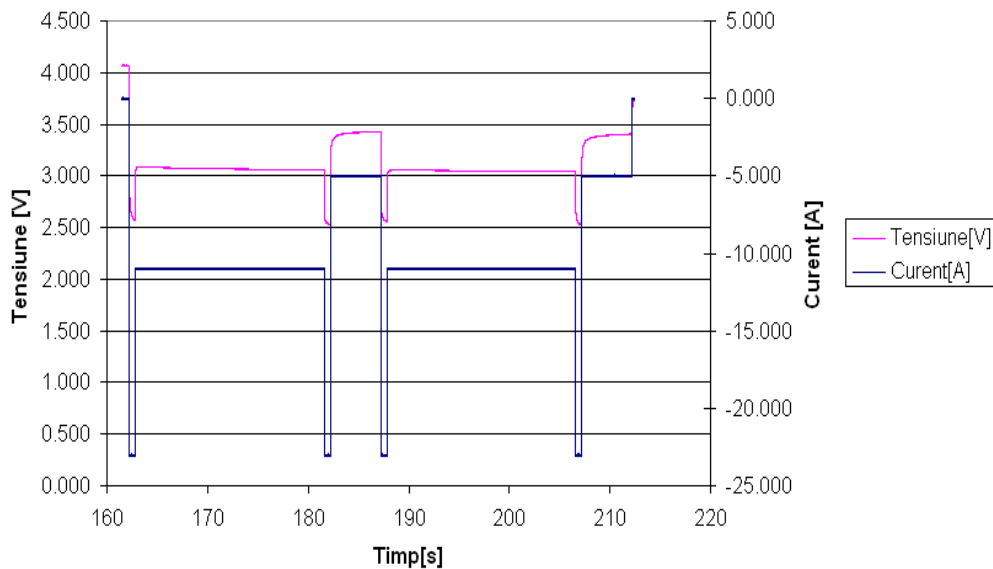


Fig. 5.12 Cicluri de descărcare după încălzire cu folii încălzitoare

În **Fig. 5.11** se observă că temperatura de -20°C se atinge în mijlocul celulei după aproximativ 160 [s] de la pornirea încălzirii cu folii încălzitoare, la suprafața celulei temperatura ajungând până la valoarea de 40°C . În acest moment se începe descărcarea bateriei cu curent corespunzător ciclurilor de frânare și rezultatele se pot vedea în **Fig. 5.12**. Curentul de descărcare este conform cu cel prescris, bateria este în stare să furnizeze curentul cerut, iar tensiunea de la bornele acestuia nu scade sub 2 [V].

Dacă se calculează rezistența internă a bateriei [5.7] pentru cele două cazuri prezentate anterior, utilizând relația (3.3), pentru timpul de descărcare t_{desc} între 1 ms și 500ms și comparăm rezultatele obținute cu rezistențele pentru temperaturi cuprinse între -10°C și 60°C , obținem curbele din **Fig. 5.13** de mai jos:

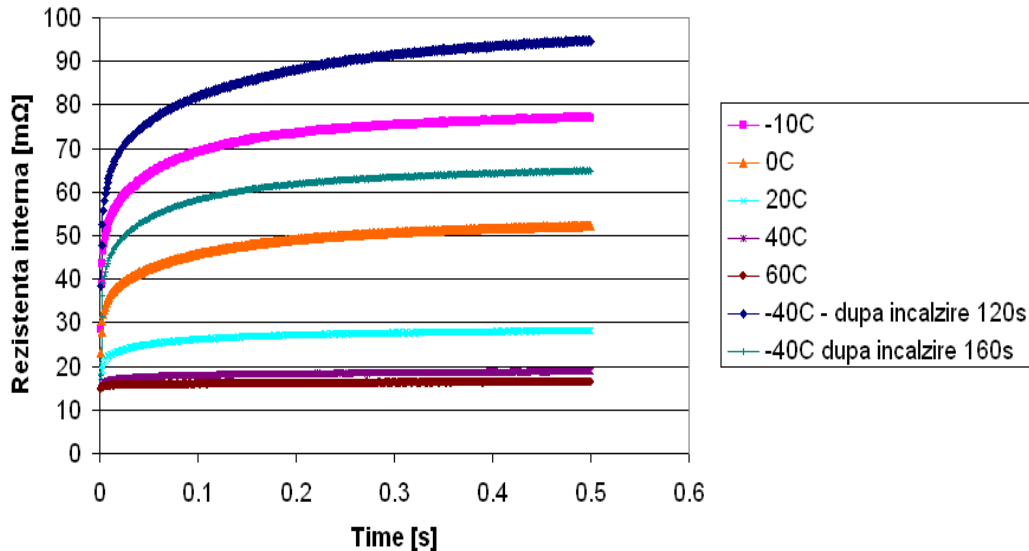


Fig. 5.13 Rezistența internă a celulei pentru curent de descărcare prescris de 23 [A] la diferite temperaturi

În **Fig. 5.13** se observă că pentru primul caz: încălzire cu folii încălzitoare timp de 120 secunde rezistența internă a celulei – calculată pentru valoarea curentului de descărcare care s-a putut obține din celulă la temperatura la care a ajuns celula (vezi **Fig. 5.10**) - pentru intervalul de timp în care curentul prescris era de 23 [A], este mai mare decât rezistența internă a celulei la temperatura -10°C . Pentru al doilea caz – încălzire cu folii încălzitoare până când mijlocul celulei atinge temperatura de -20°C - valoarea rezistenței interne a celulei se situează între valoarea rezistenței interne obținute pentru temperatura de -10°C și cea obținută pentru temperatura 0°C . Deci, din punct de vedere al valorii rezistenței interne, bateria se comportă corespunzător unei temperaturi situate în jurul valorii de -5°C .

În concluzie, utilizând soluția încălzirii bateriei cu folii încălzitoare așa cum s-a prezentat anterior, bateria este în stare să furnizeze energie la parametrii utili aplicației alimentate după aproximativ 160 [s] de la pornirea încălzirii, temperatura inițială minimă fiind de -40°C . După 120 [s] bateria este capabilă să furnizeze curent, dar nu la valoarea și pe durata cerută de aplicație.

5.3 Autoîncălzirea bateriilor de tip Li-ion 26650 în timpul proceselor de descărcare

5.3.1 Estimarea puterii disipate în interiorul bateriei în timpul procesului de descărcare

O altă problemă apărută în timpul testelor de descărcare a bateriilor Li-ion este aceea a autoîncălzirii acestora pe durata descărcării [5.5]. Datorită reacțiilor electrochimice care au loc în interiorul acestora pe durata descărcării, bateriile se încălzesc. Trebuie avut în vedere faptul că temperatura bateriei nu trebuie să depășească 60 °C – temperatură maximă specificată de către producător, valori ale temperaturii bateriei peste 60 °C producând accelerarea îmbătrânirii acestora și pot fi periculoase în exploatare.

În scopul simulării distribuției temperaturii în interiorul bateriei în timpul procesului de descărcare a acesteia, s-a realizat un model termic corespunzător acestui proces utilizând programul Matlab/Simulink cu biblioteci de componente termice Simscape. În acest caz vom avea surse de căldură în interiorul bateriei, nu în exterior ca în cazul încălzirii cu folii încălzitoare. Sursele de căldură din interiorul bateriei se datorează pierderilor de putere din timpul procesului de descărcare. Puterea pierdută de baterie, care în timp se transformă în căldură în interiorul bateriei, este proporțională cu valoarea curentului descărcat din baterie și se calculează cu relația:

$$P_{actual_dis} = (U_{actual_OCV} - U_{actual_bat}) * I_{actual_bat} \text{ [W]} \quad (5.14)$$

Unde: U_{actual_OCV} [V] - tensiunea de mers în gol a bateriei corespunzătoare stării de încărcare actuale a bateriei;

U_{actual_bat} [V] - valoarea tensiunii de la bornele bateriei la momentul actual, în timpul descărcării acesteia;

I_{actual_bat} [A] - curentul de descărcare de la momentul actual;

Tensiunea de mers în gol a bateriei în timpul descărcării acesteia se determină calculând starea de încărcare a acesteia cu ajutorul contorului amperi-oră. Diferența dintre tensiunea de mers în gol a bateriei și tensiunea actuală a bateriei, din timpul descărcării, reprezintă căderea de tensiune pe rezistența internă a bateriei. În **Fig. 5.14** se pot vedea graficele tensiunii de mers în gol și tensiunii la bornele bateriei în timpul descărcării cu curent constant de 2 [A] la temperatura -10 °C:

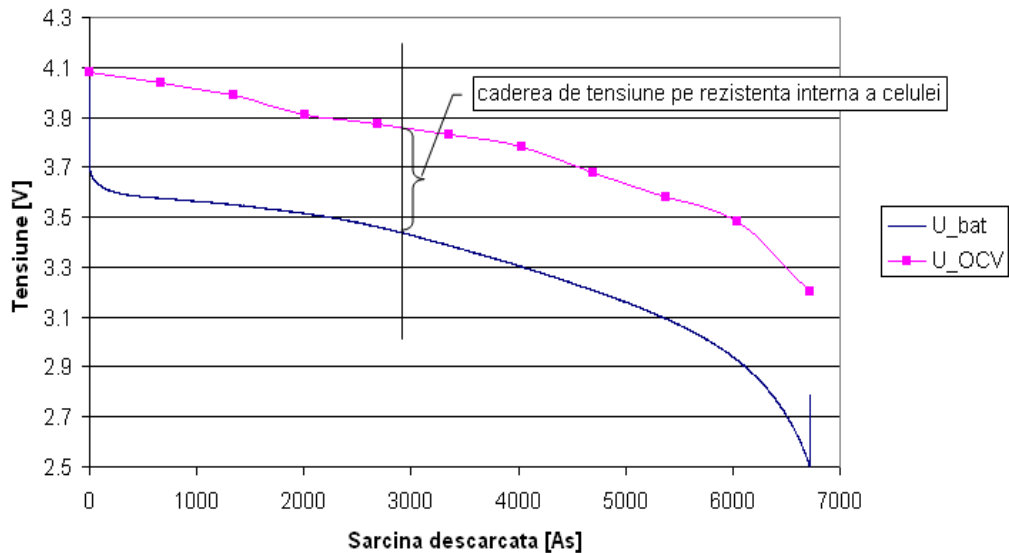


Fig. 5.14 Tensiunea de mers în gol și tensiunea la bornele celulei în timpul descărcării cu curent constant 2 [A], temperatura inițială -10 °C

Dacă se dorește aflarea căldurii disipate în interiorul bateriei în timpul descărcării acesteia, se integrează în timp puterea calculată cu relația (5.14):

$$Q_{dis} = \int_{t_{desc}} P_{actual_dis} * dt \text{ [Wh]} \quad (5.15)$$

Unde Q_{dis} - căldura disipată în interiorul bateriei în timpul de descărcare t_{desc}

Pentru a simula evoluția temperaturii în timp în interiorul celulei în timpul procesului de descărcare se consideră că fiecare strat din cele 13 din interiorul acesteia generează căldură proporțional cu volumul acestuia. Având în vedere caracteristicile constructive ale unei celule de tip Li-ion 26650, se poate considera că primul strat, cel exterior, nu generează căldură în timpul descărcării bateriei, deoarece cea mai mare parte din acesta o constituie carcasa exterioară a bateriei, din oțel, după cum se poate observa și din **Fig. 5.15** de mai jos. Stratul exterior va transmite căldura prin conducție termică de la interior la exterior și de asemenea la suprafața lui va exista degajare de căldură prin convecție termică.

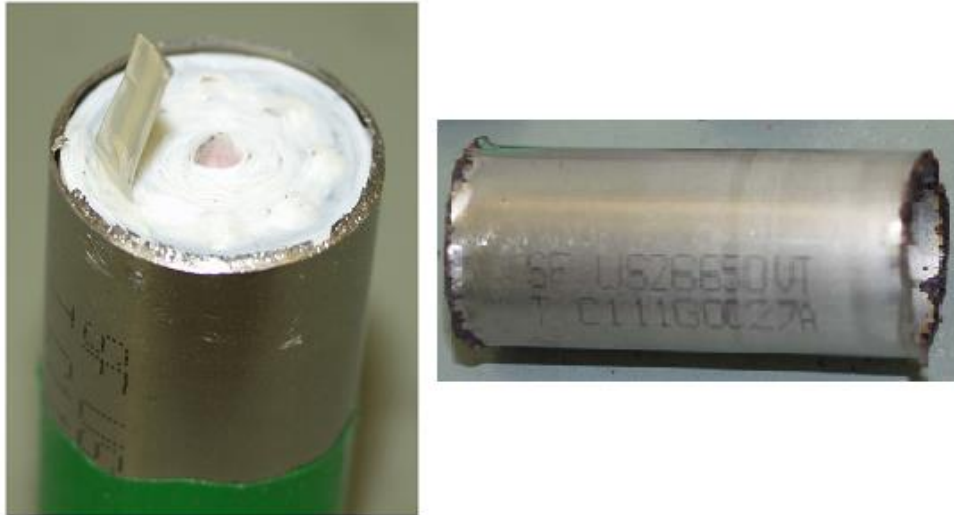


Fig. 5.15 Carcasa unei celule de tip Li-ion 26650 Sony

De aceea, datele din tabelul 4.1 se vor recalcula, luând în considerare volumul total al celulei care produce căldură și raportând celelalte valori ale volumelor la această valoare totală. Căldura disipată în interiorul bateriei este distribuită pe fiecare strat al bateriei, proporțional cu volumul stratului. Deci pentru fiecare strat va exista o sursă de căldură care va simula disiparea căldurii în stratul respectiv, proporțional cu volumul acestuia. Acest lucru se reprezintă în modelul termic prin elemente de circuit speciale existente în biblioteca de componente Simscape din Matlab/Simulink - sursele ideale de căldură - după cum se poate vedea și în **Fig. 5.16**:

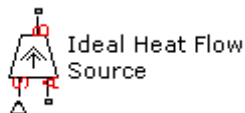


Fig. 5.16 Element din biblioteca Simscape: sursă ideală de căldură

Volumul total activ al celulei, care produce curent, se obține din volumul total al celulei calculat anterior cu relația (5.8) din care se scade volumul primului strat, cel exterior, care în mare parte este constituit din carcasa de oțel a celulei. Deci volumul total activ al celulei va fi:

$$V_{total_activ} = V_{total} - V_{strat1} = 34510.39 - 5104.75 = 29405.64 [mm^3] \quad [5.16]$$

Procentele corespunzătoare pentru volumul fiecărui strat activ din totalul volumului activ al celulei sunt prezentate în tabelul. 5.2:

Tab.5.2 Volumele calculate și în procente ale fiecărui strat al celei

Strat	Volum [mm ³]	% din volumul total
2	4694.3	16
3	4286.1	14.5
4	3877.9	13.2
5	3469.7	11.8
6	3061.5	10.4
7	2653.3	9.1
8	2245.1	7.7
9	1836.9	6.3
10	1428.7	4.9
11	1020.5	3.5
12	629.2	2.0
13	204.1	0.6

Căldura totală disipată se calculează pe baza valorilor curentului de descărcare, tensiunii de la bornele bateriei și a tabelului de valori fixe pentru tensiunea de mers în gol a bateriei funcție de starea de încărcare a acesteia, așa cum se poate vedea și în **Fig. 5.17**:

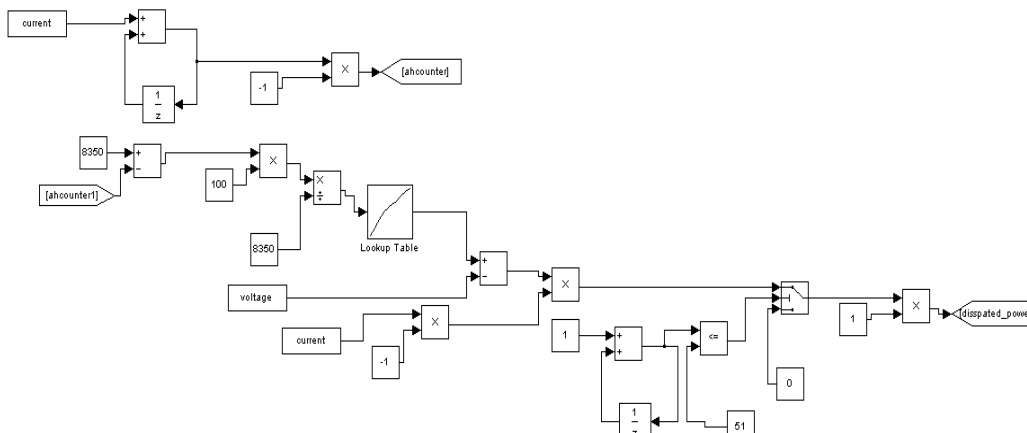


Fig. 5.17 Calcularea căldurii disipate în interiorul bateriei în timpul descărcării

La suprafața celei este modelată convecția termică prin elementul din biblioteca de componente Simscape din Matlab *Convective Heat Transfer*:, așa cum se poate vedea și în **Fig. 5.18**.

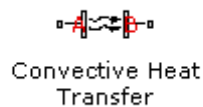


Fig. 5.18 Modelarea pierderii de căldură prin convecție la suprafața bateriei

Quantități de căldură disipate pe fiecare strat $q_{dis_strat2} \dots q_{dis_strat13}$ sunt calculate din valoarea căldurii totale disipate în interiorul bateriei în timpul procesului de descărcare, după cum se poate vedea și în **Fig. 5.19**:

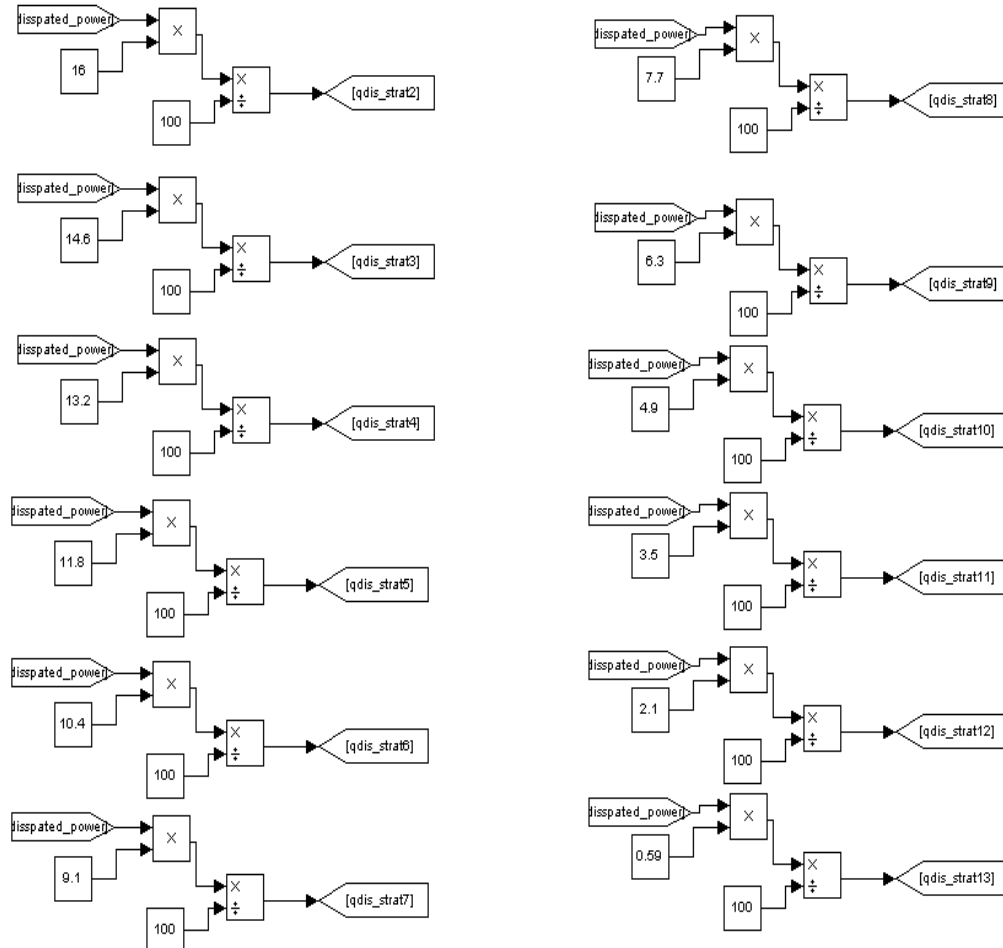


Fig. 5.19 Calcularea căldurii disipate în fiecare strat

Modelul termic corespunzător încălzirii interne a bateriei având sursele de căldură precizate mai sus este prezentat în **Fig.5.20**.

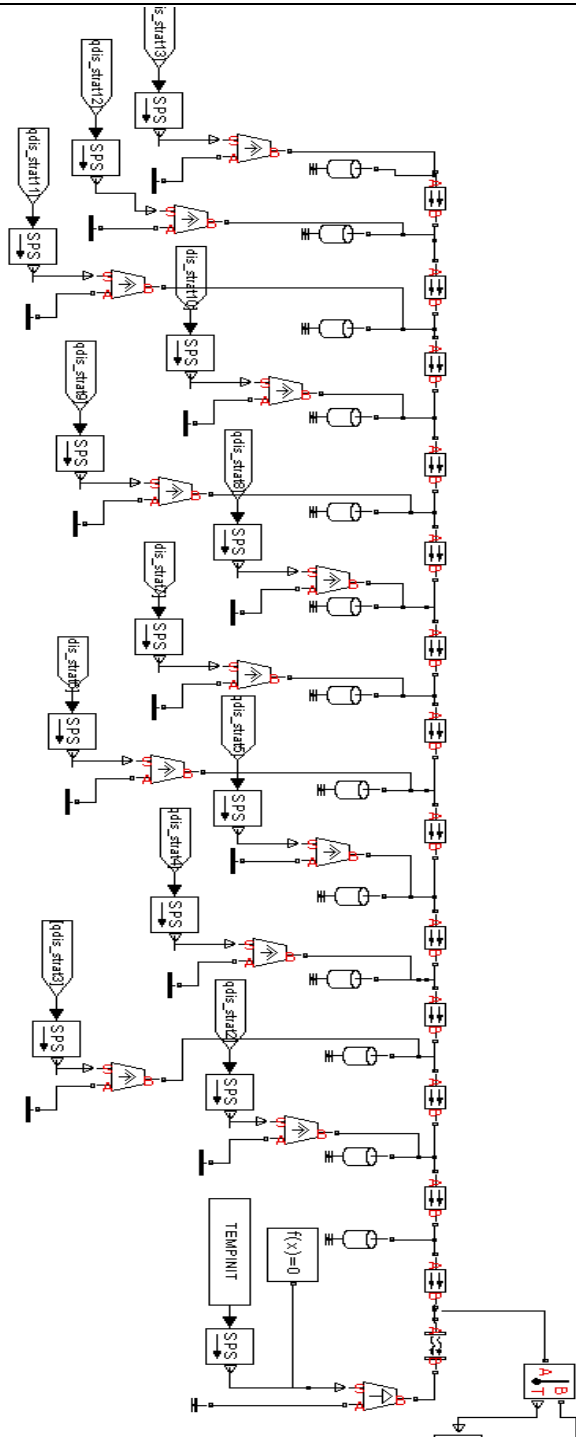


Fig. 5.20 Modelul termic pentru disiparea căldurii în interiorul celulei Li-ion

5.3.2 Validarea experimentală a modelului termic al celulei

Pentru a verifica acest model termic s-au făcut câteva teste cu diverși curenți de descărcare, pornind de la diferite valori ale temperaturii bateriei. S-a măsurat temperatura pe suprafața bateriei în timpul descărcărilor și s-au comparat valorile măsurate cu cele simulate cu ajutorul modelului termic mai sus prezentat. Ca date de intrare pentru modelul termic s-au folosit datele măsurate pentru curent și tensiunea bateriei – în **Fig.5.17** *current* și *voltage*, se calculează contorul amperioră prin integrarea în timp a curentului de descărcare, se calculează apoi starea de încărcare a bateriei, apoi cu ajutorul tabelului cu valori fixe se estimează valoarea tensiunii de mers în gol a bateriei. Din această valoare se scade valoarea actuală a tensiunii bateriei în timpul descărcării și rezultatul acestei diferențe se înmulțește cu valoarea curentului de descărcare. Rezultatul este puterea disipată în interiorul celulei în timpul descărcării acesteia. Disiparea căldurii în interior este modelată prin distribuirea acesteia pe straturi, proporțional cu volumul fiecărui strat.

A. Procese de descărcare a celulelor cu curent constant

În **Fig. 5.21, 5.22, 5.23, 5.24, 5.25, 5.26, 5.27 și 5.28** sunt prezentate datele rezultate în urma simulărilor și în comparație, cele măsurate în timpul descărcării complete cu curent constant 10 [A] și 2 [A], temperaturile inițiale fiind: -10 °C, 0 °C, 20 °C și respectiv 60 °C. Celula s-a considerat complet descărcată în momentul când tensiunea la bornele ei în timpul descărcării ajunge la valoarea 2.5 [V]. Se poate observa variația temperaturii pe suprafața exterioară a celulei în timpul descărcării pentru cazurile enumerate mai sus:

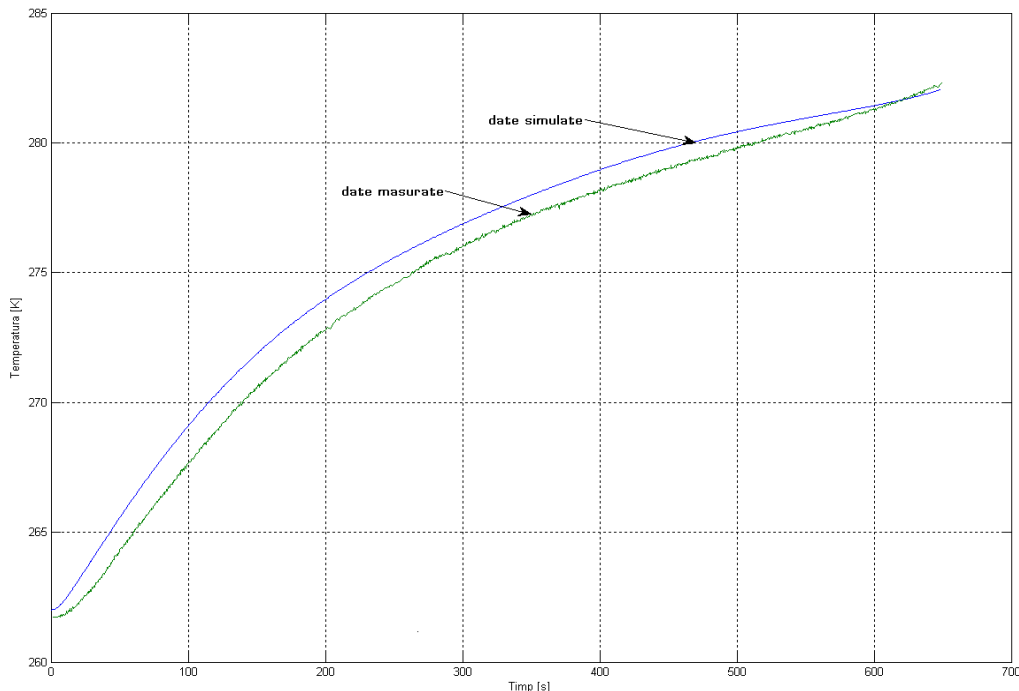


Fig. 5.21 Variația temperaturii pe suprafața exterioară a celulei în timpul descărcării complete a acesteia cu curent constant 10 [A], temperatura inițială 262 [K]

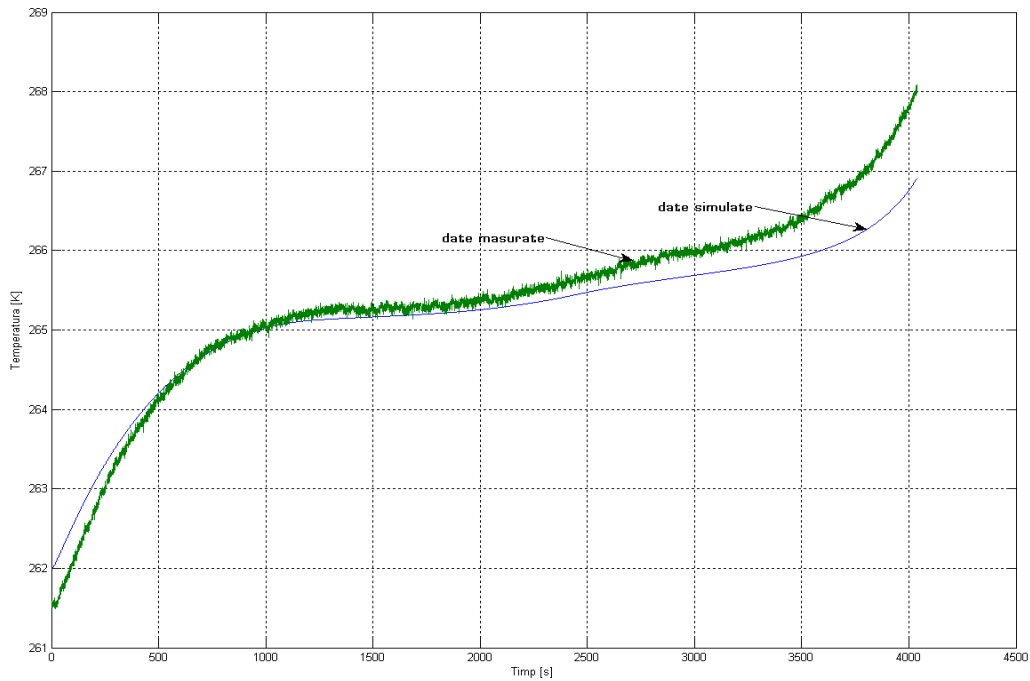


Fig. 5.22 Variația temperaturii pe suprafața exterioară a celulei în timpul descărcării complete a acesteia cu curent constant 2 [A], temperatura inițială 262 [K]

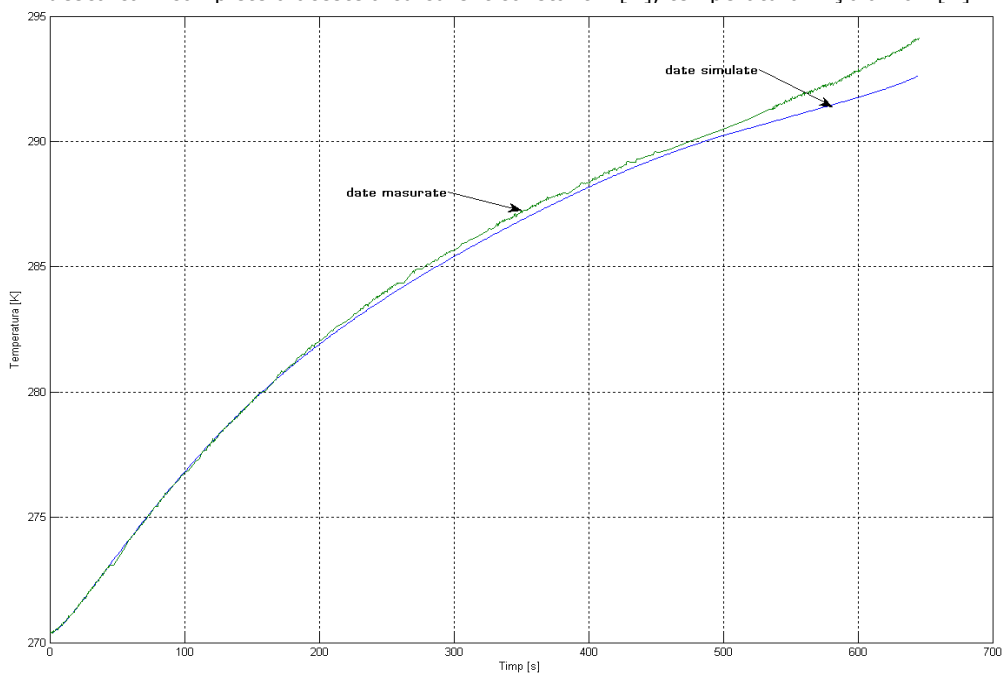


Fig. 5.23 Variația temperaturii pe suprafața exterioară a celulei în timpul descărcării complete a acesteia cu curent constant 10 [A], temperatura inițială 271 [K]

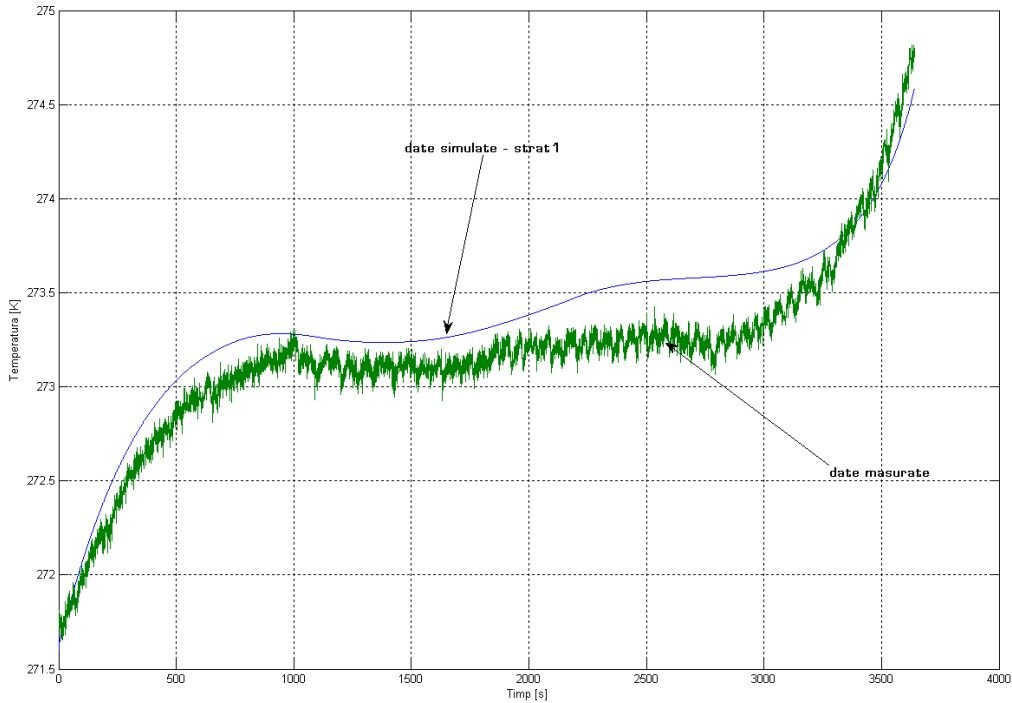


Fig. 5.24 Variația temperaturii pe suprafața exterioară a celulei în timpul descărcării complete a acesteia cu curent constant 2 [A], temperatura inițială 271 [K]

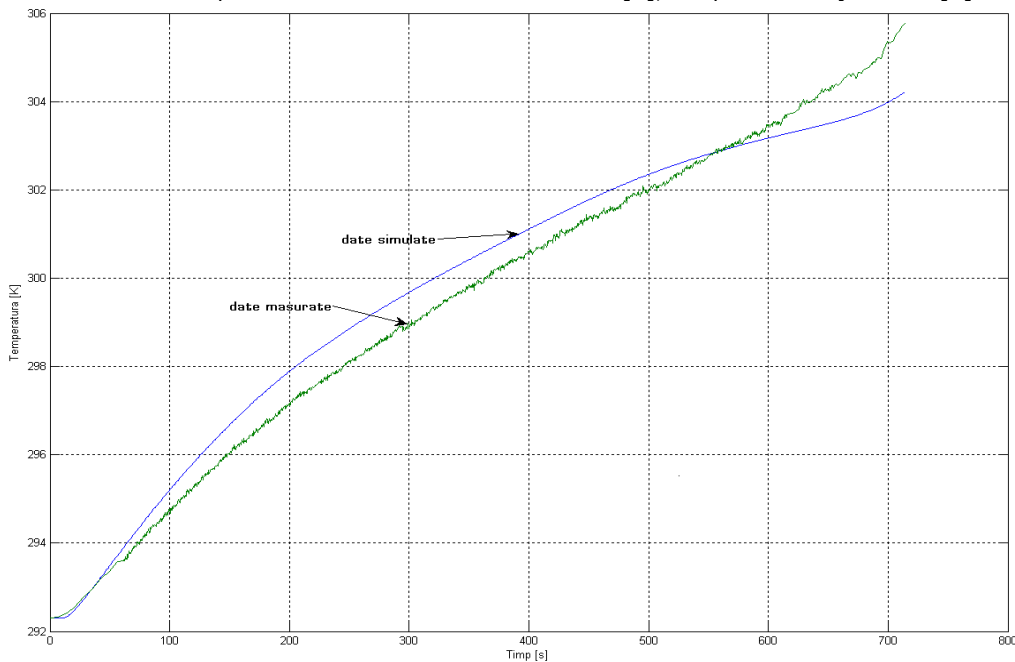


Fig. 5.25 Variația temperaturii pe suprafața exterioară a celulei în timpul descărcării complete a acesteia cu curent constant 10 [A], temperatura inițială 292 [K]

150 Cercetări teoretice și experimentale privind comportamentul termic - 5.

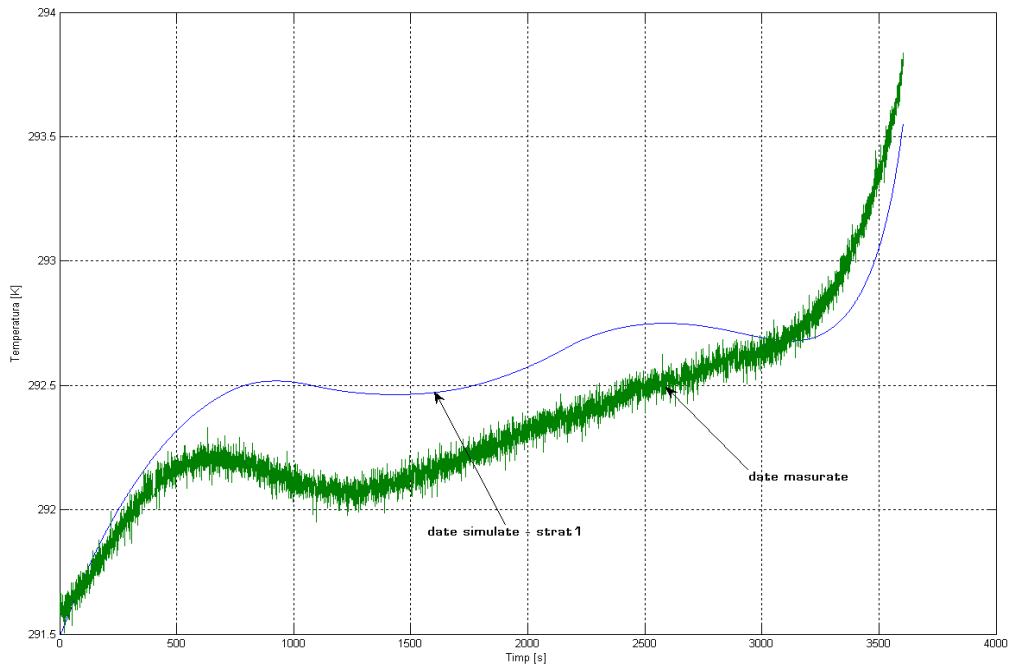


Fig. 5.26 Variația temperaturii pe suprafața exterioară a celulei în timpul descărcării complete a acesteia cu curent constant 2 [A], temperatura inițială 291.5 [K]

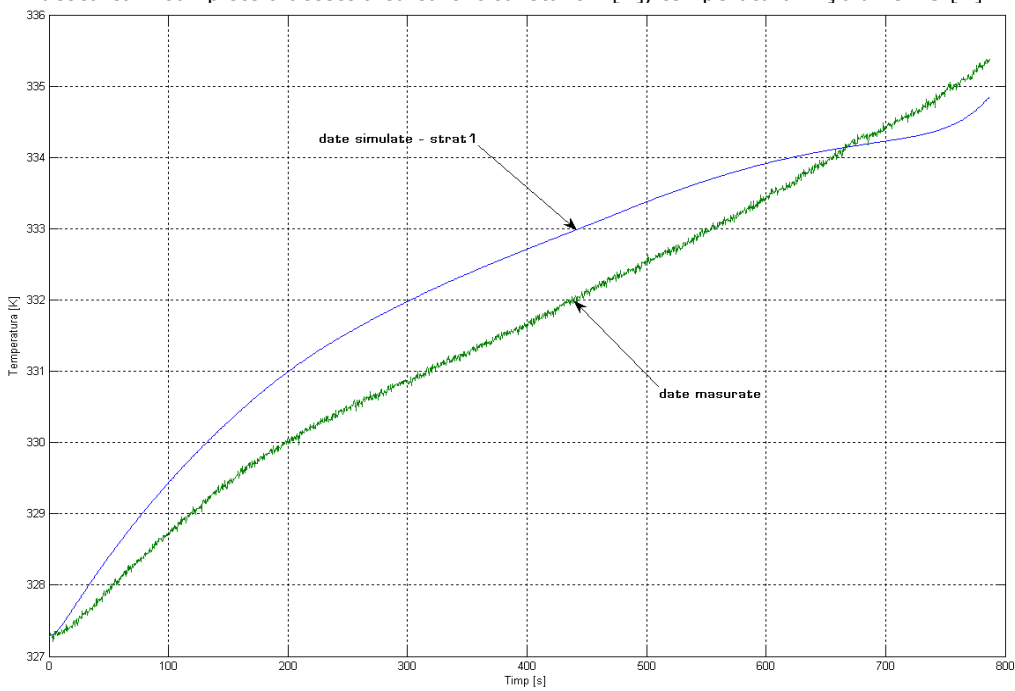


Fig. 5.27 Variația temperaturii pe suprafața exterioară a celulei în timpul descărcării complete a acesteia cu curent constant 10 [A], temperatura inițială 327 [K]

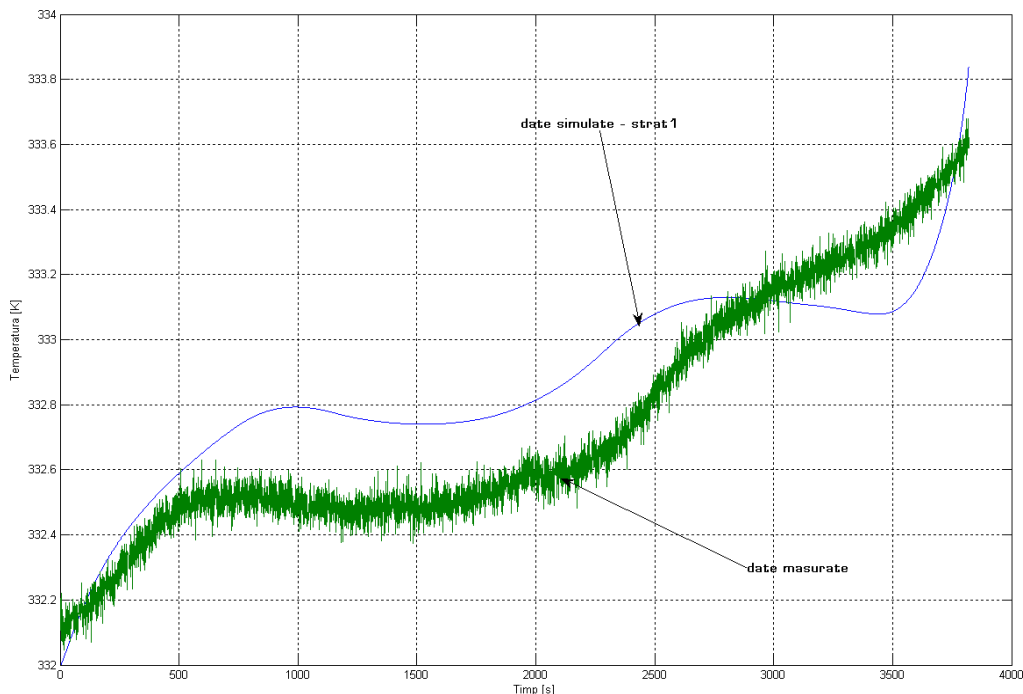


Fig. 5.28 Variația temperaturii pe suprafața exterioară a celulei în timpul descărcării complete a acesteia cu curent constant 2 [A], temperatura inițială 332 [K]

Din datele prezentate mai sus se poate observa că la temperatură scăzută -10°C , 0°C , temperatura pe suprafața celulei crește cu aproximativ 20 grade pentru un curent de descărcare de 10 [A], în timp ce pentru un curent de descărcare de 2 [A] creșterea de temperatură pe suprafața exterioară este de 5 - 6 grade. La temperaturi mai mari, 20°C , 60°C , creșterea de temperatură este mai mică, de numai 2 grade pentru valori ale curentului de descărcare 2[A] și de 8 grade pentru valori ale curentului de descărcare de 10 [A]. Aceste teste confirmă faptul că pierderile de putere în interiorul bateriei sunt proporționale cu valoarea curentului de descărcare și cu valoarea rezistenței interne a bateriei. La temperaturi sub 0°C valoarea acestei rezistențe este mare și pentru aceeași valoare a curentului de descărcare încălzirea bateriei este mai pronunțată la valori scăzute ale temperaturii. Această comportare a bateriei ajută în funcționarea acesteia, la temperaturi joase producându-se o autoîncălzire mai pronunțată a bateriei, pe măsură ce aceasta se încălzește, rezistența scade și pierderile de căldură în interiorul acesteia scad. Acest lucru se vede cel mai bine privind graficele variației temperaturii de la suprafața celulei în timpul descărcării complete a acesteia cu curent de 2 [A] și respectiv 10 [A] la temperatura mediului ambiant de 60°C , în **Fig. 5.27** și **5.28**.

Dacă se compară datele măsurate ale temperaturii de la suprafața celulei și rezultatele simulate, obținute în urma rulării modelului termic, se observă o foarte bună corelație între acestea, diferențele care apar sunt de maximum 1 grad. De asemenea, evoluția în timp a temperaturii de la suprafața celulei, estimate cu ajutorul modelului termic, respectă forma de variație a temperaturii măsurate cu ajutorul termocupului. Având această strânsă corelație între rezultatele simulate și cele măsurate se pot estima în continuare, cu ajutorul aceluiași model termic,

152 Cercetări teoretice și experimentale privind comportamentul termic - 5.

evoluțiile în timp ale temperaturilor celorlalte straturi interioare ale celulei, deci putem estima variația în timp a temperaturii pe secțiunea transversală a celulei. Aceste rezultate ne vor ajuta în continuare la elaborarea unor strategii de exploatare optimă a bateriilor pe toată durata de viață a acestora. În **Fig. 5.29** și **5.30** sunt prezentate graficele variației temperaturilor pe straturile celulei în timpul descărcării cu curent constant de 10 [A] și respectiv 2 [A] pentru temperatura mediului ambiant de -10 °C:

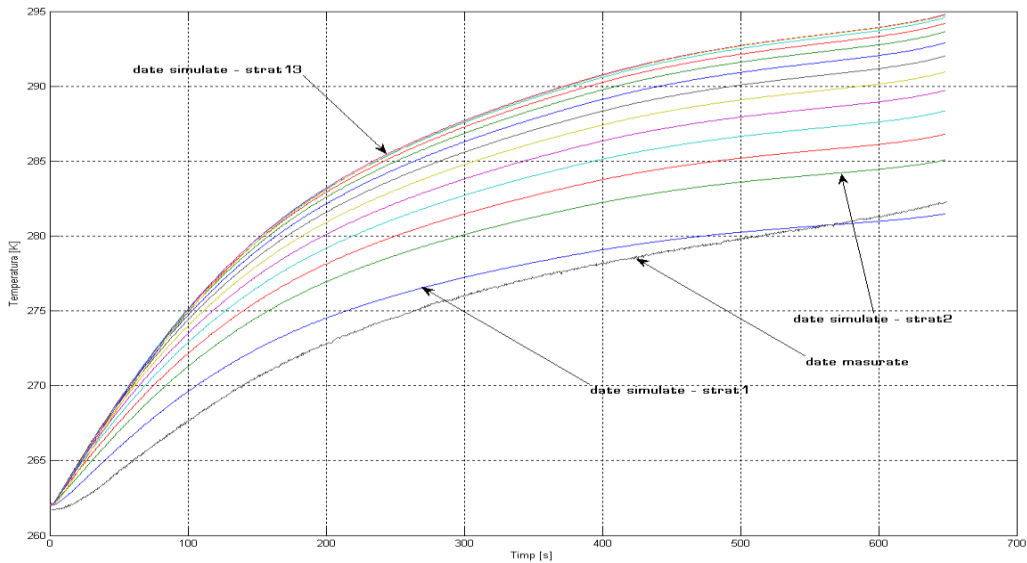


Fig. 5.29 Variația temperaturii pe straturile celulei în timpul descărcării complete a acesteia cu curent constant 10 [A], temperatura inițială 262 [K]

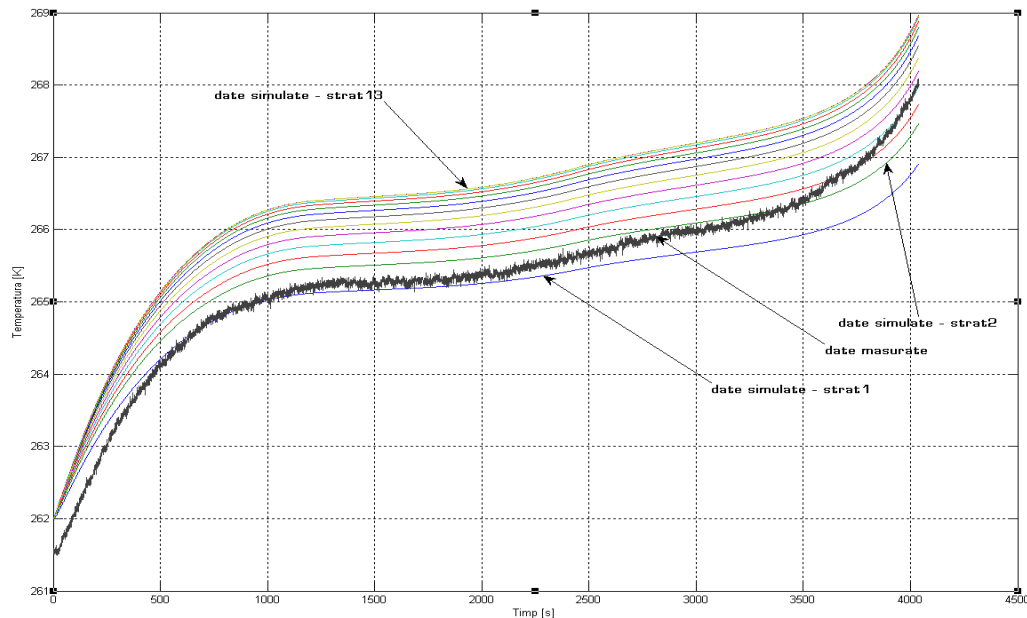


Fig. 5.30 Variația temperaturii pe straturile celulei în timpul descărcării complete a acesteia cu curent constant 2 [A], temperatura inițială 262 [K]

În cazul descărcării cu curent de 10 [A] se poate observa că în mijlocul celei – stratul 13 – temperatura este cu 10 grade mai mare decât temperatura de la suprafața celei. În cazul descărcării cu curent de 2 [A] temperatura în mijlocul celei este mai mare cu numai 2 grade față de cea de la suprafața celei. Pentru temperatura mediului ambiant de 0 °C, graficele de variație a temperaturii în timpul descărcării celei cu curent constant sunt prezentate în **Fig. 5.31** și **5.32**:

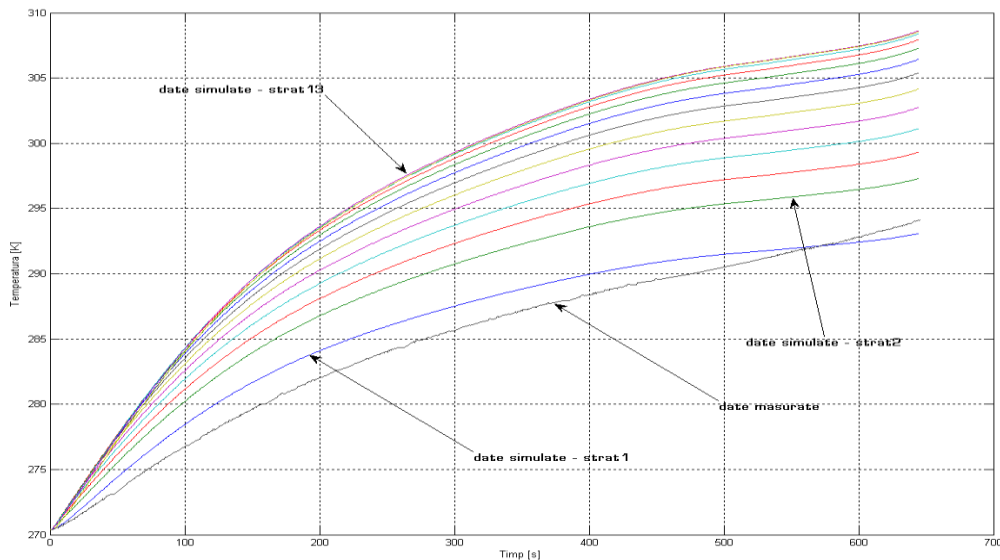


Fig. 5.31 Variația temperaturii pe straturile celei în timpul descărcării complete a acesteia cu curent constant 10 [A], temperatura inițială 271 [K]

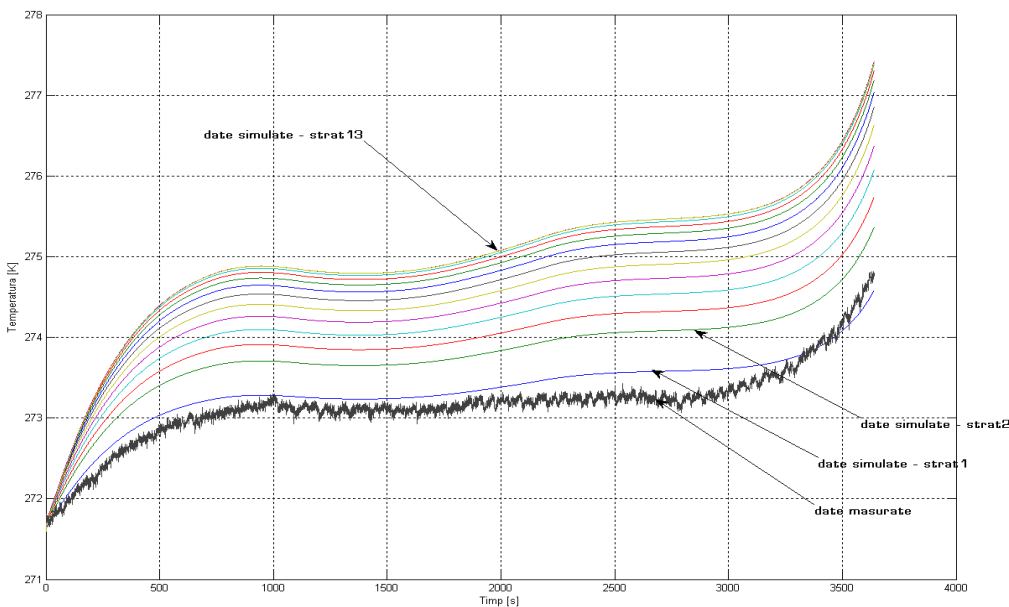


Fig. 5.32 Variația temperaturii pe straturile celei în timpul descărcării complete a acesteia cu curent constant 2 [A], temperatura inițială 272 [K]

Comportarea termică a bateriei în timpul descărcării cu curent constant la temperatura mediului ambiant de 0 °C este asemănătoare cu cea de la -10 °C, temperatura în mijlocul celulei fiind cu aproximativ 10 grade mai mare decât cea de la suprafața acesteia în cazul descărcării cu 10 [A] și cu 2 grade în cazul descărcării cu 2 [A].

Pentru temperatura mediului ambiant de 60 °C trebuie studiată comportarea termică a bateriei, deoarece specificațiile producătorului precizează temperaturi ale bateriilor de până la 60 °C în timpul funcționării acestora. Peste temperatura de 60 °C procesul de îmbătrânire a bateriilor de tip Li-ion se accelerează. Graficele de variație a temperaturii pe straturile bateriei pentru descărcare cu curent constant de 10 [A] și respectiv 2 [A] se prezintă în **Fig. 5.33** și **5.34**:

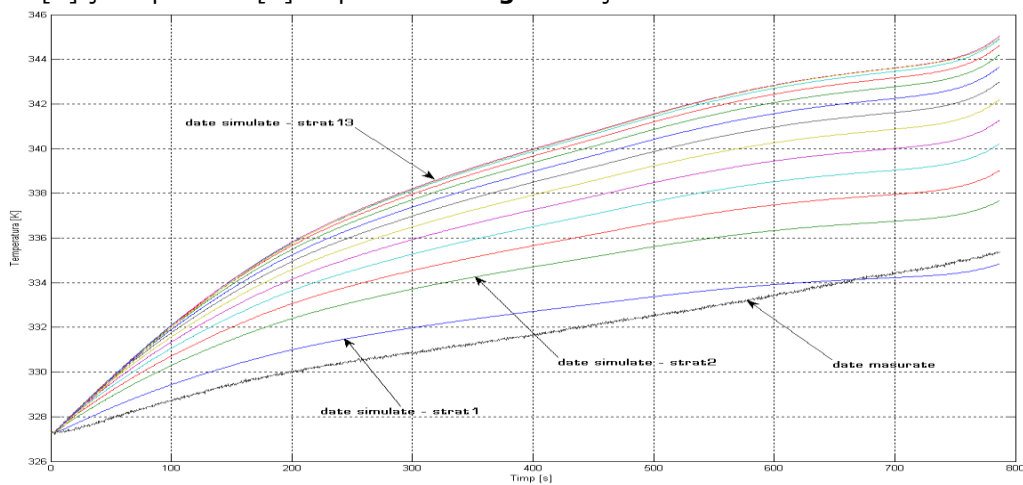


Fig. 5.33 Variația temperaturii pe straturile celulei în timpul descărcării complete a acesteia cu curent constant 10 [A], temperatura inițială 327 [K]

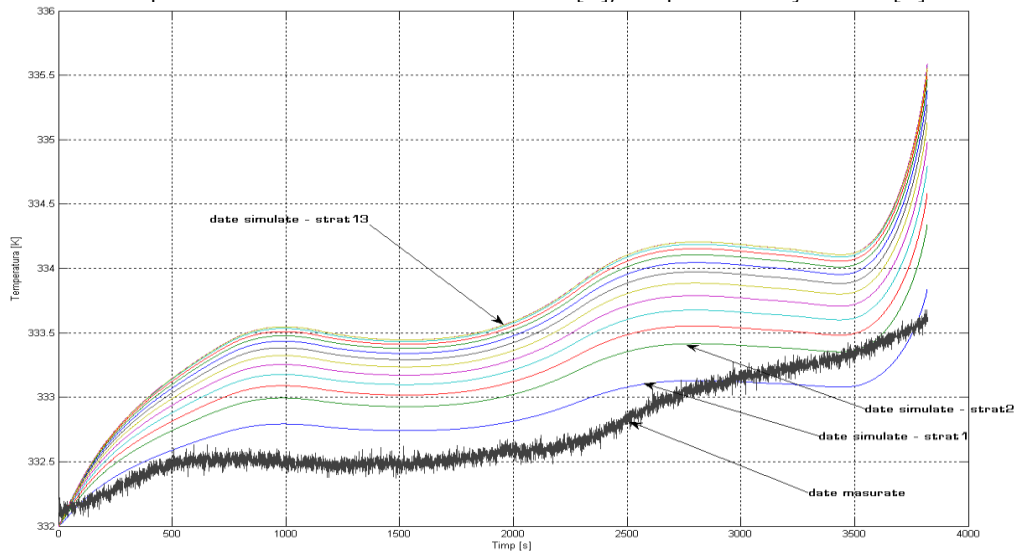


Fig. 5.34 Variația temperaturii pe straturile celulei în timpul descărcării complete a acesteia cu curent constant 2 [A], temperatura inițială 332 [K]

În **Fig. 5.33** se observă că la sfârșitul descărcării celulei cu curent de 10 [A] temperatura în mijlocul acesteia este de 345K (+72 °C), la suprafața acesteia temperatura ajunge la 335K (+62 °C), temperatura inițială a celulei fiind 327K (+54 °C). Pentru cazul descărcării celulei cu curent de 2 [A] temperatura în mijlocul celulei la sfârșitul descărcării este de aproximativ 335 K (+62 °C), la suprafața acesteia temperatura ajunge la 334 K (+61 °C), temperatura inițială a celulei fiind 332 K (+59 °C). Deoarece temperatura în mijlocul celulei în cazul descărcării cu curent constant de 10 [A] depășește 60 °C, descărcarea acesteia cu curent mai mare de 1C (2.5 A) pentru timp îndelungat trebuie evitată. În continuare trebuie studiată comportarea celulei în timpul descărcării cu curent corespunzător ciclurilor de frânare, temperatura inițială a celulei fiind de 60 °C.

B. Procese de descărcare a celulelor cu profiluri de curent corespunzătoare ciclurilor de frânare

În **Fig. 5.35** și **5.37** sunt prezentate datele rezultate în urma simulărilor și în comparație cele măsurate în timpul descărcării celulelor cu un profil de curent corespunzător pentru 2 cicluri de frânare succesive, în primul caz pornind de la temperatura mediului ambiant care este și temperatura inițială pentru toată celula de -21 °C, în al doilea caz temperatura este de 40 °C.

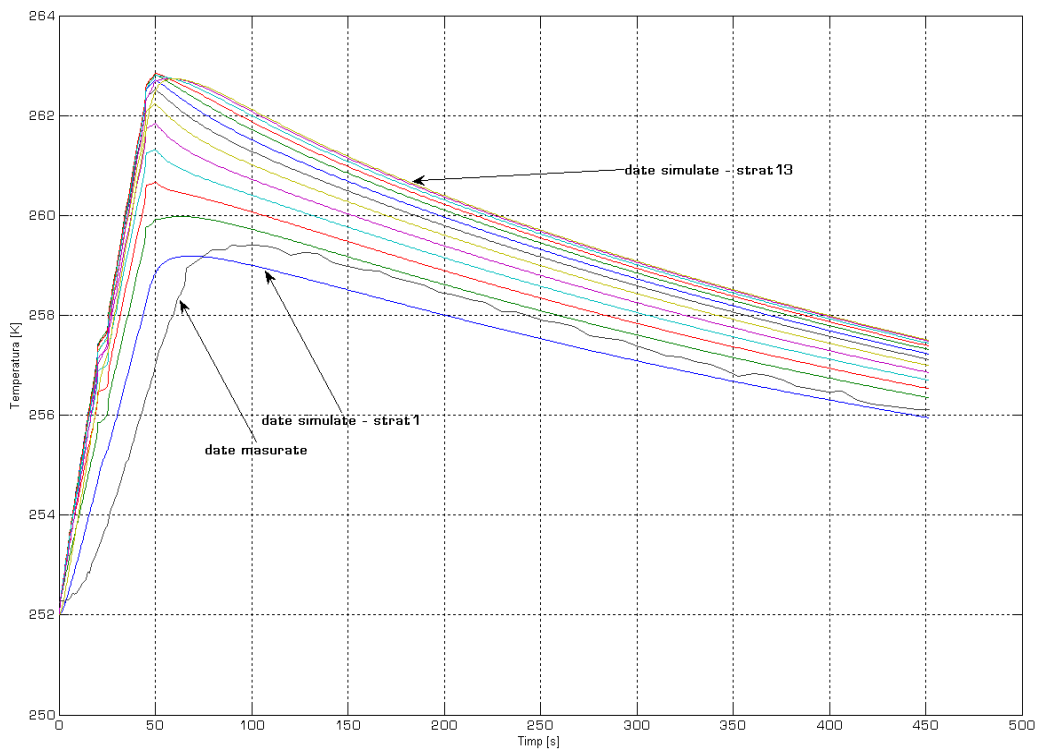


Fig. 5.35 Variația în timp a temperaturii pe straturile celulei în timpul procesului de descărcare cu profil de curent corespunzător pentru două cicluri de frânare, la temperatura inițială -21 °C

Datele de intrare pentru modelul termic prezentat sunt curbele măsurate ale curentului de descărcare și tensiunii de la bornele bateriei în timpul descărcării, în **Fig. 5.35** se poate vedea rezultatul acestor măsurători:

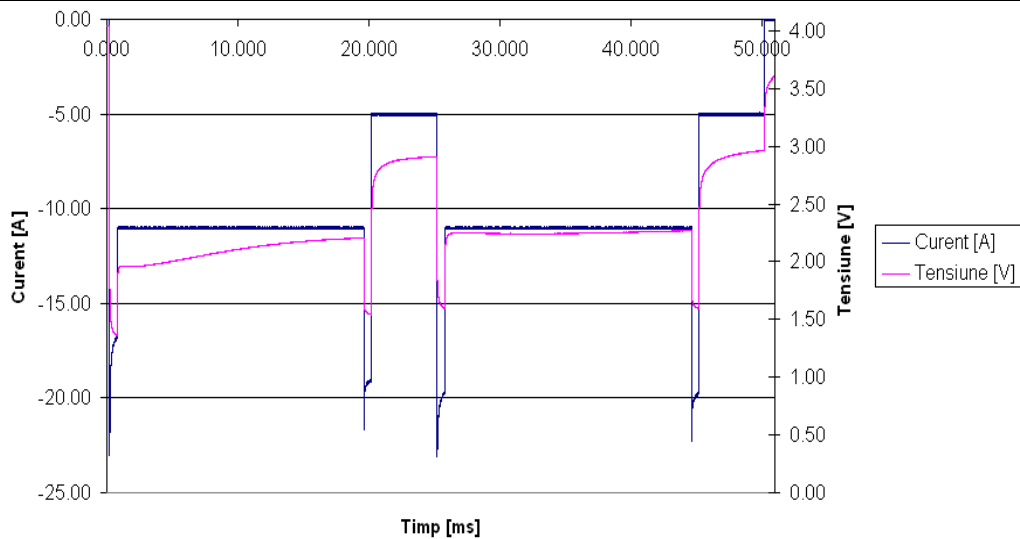


Fig. 5.36 Curentul de descărcare și tensiunea celulei în timpul descărcării cu 2 cicluri de descărcare succesive la temperatura -21 °C

Caracteristicile curentului și tensiunii prezentate în **Fig. 5.36** sunt importate în programul Matlab sub forma unor fișiere text care reprezintă datele de intrare în modelul termic. În **Fig. 5.19** se poate vedea că aceste date sunt folosite la calculul căldurii totale disipate în interiorul celulei.

La temperatura de 40 °C se aplică același scenariu de testare, celula se descarcă cu un curent corespunzător pentru două cicluri de frânare succesive. Variația temperaturii de la suprafața celulei este prezentată în **Fig. 5.37**:

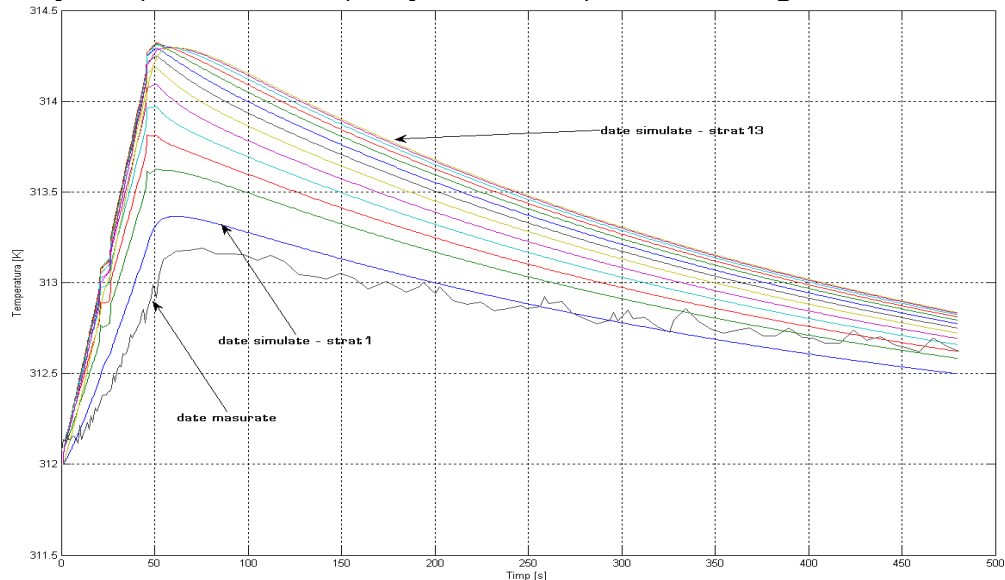


Fig. 5.37 Variația în timp a temperaturii pe straturile celulei în timpul procesului de descărcare cu profil de curent corespunzător pentru două cicluri de frânare, la temperatura inițială 39 °C

Curbele măsurate ale curentului de descărcare și tensiunii la bornele celulei în timpul descărcării pentru descărcarea celulei la temperatura 39 °C sunt prezentate în **Fig. 5.38**:

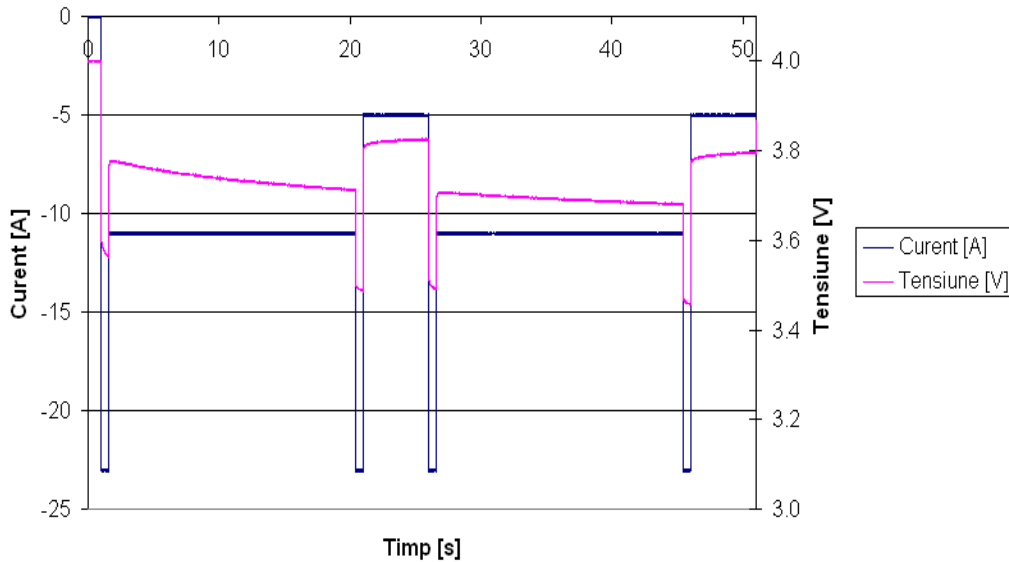


Fig. 5.38 Curentul de descărcare și tensiunea celulei în timpul descărcării cu 2 cicluri de descărcare succesive la temperatura 39 °C

Comparând rezultatele obținute pentru cele două teste efectuate la temperaturi diferite, se observă că încălzirea celulei este mai pronunțată în cazul descărcării la temperatura de -21 °C: la suprafață celula s-a încălzit aproximativ 7 grade, în comparație cu încălzirea produsă la temperatura de 39 °C care este de numai de aproximativ 1 grad. Acest lucru se datorează rezistenței interne a celulei care este mai mare la temperaturi scăzute. Și în curbele curentului și tensiunii la bornele celulei în timpul descărcării se poate observa că tensiunea celulei în timpul descărcării este mult mai mică la temperatura de -21 °C față de cea de la 39 °C, pierderile de putere pe rezistența internă a celulei, care se transformă în căldură, sunt mai mari la temperaturi scăzute ale celulei. Pentru mijlocul celulei, rezultatele simulate arată o încălzire de peste 10 grade în cazul descărcării la temperatura de -21 °C și de peste 2 grade în cazul descărcării la temperatura de 40 °C.

În **Fig. 5.39** se pot vedea caracteristicile de variație a temperaturii pe straturile celulei în timpul descărcării celulei cu curent corespunzător pentru 5 cicluri de frânare, temperatura inițială fiind de aproximativ 40 °C:.

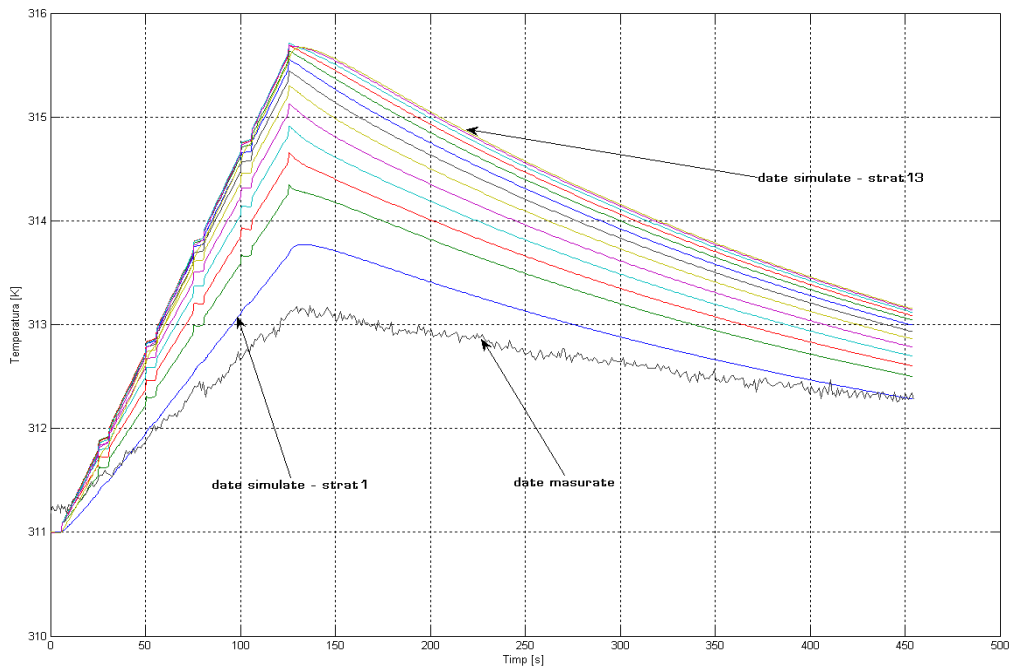


Fig. 5.39 Variația în timp a temperaturii pe straturile celulei în timpul procesului de descărcare cu profil de curent corespunzător pentru 5 cicluri de frânare, la temperatura inițială 39 °C

În **Fig. 5.40** se pot vedea curbele tensiunii și curentului celulei în timpul descărcării acesteia cu curent corespunzător pentru 5 cicluri de frânare la temperatura mediului ambiant de 40 °C, date care s-au folosit pentru calcularea puterii disipate în timpul procesului de descărcare.

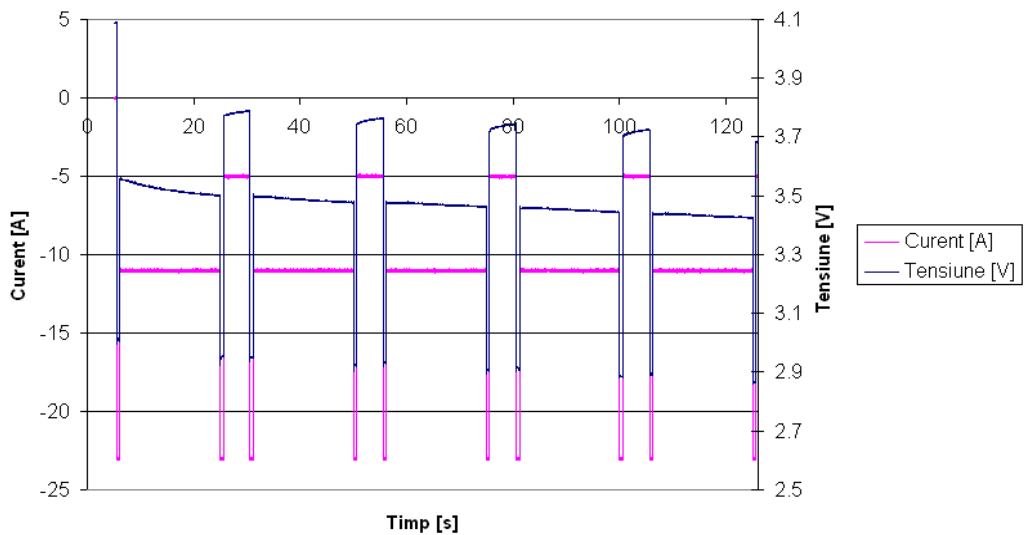


Fig. 5.40 Descărcarea unei celule de tip Li-ion Sony 26650 cu curent corespunzător pentru 5 cicluri de frânare

În cazul descărcării cu curent corespunzător pentru 5 cicluri de frânare se observă că temperatura de la suprafața celulei crește cu 2 - 2.5 grade, iar temperatura în mijlocul celulei crește în timpul descărcării cu mai mult de 4.5 grade, creșteri mai mari decât în cazul descărcării celulei cu 2 cicluri de frânare la aceeași temperatură.

Din graficele prezentate rezultă că pentru aceste scenarii de testare încălzirea celulei este de numai câteva grade în ansamblu. Deși curenții de descărcare sunt relativ mari (23 [A] și 11 [A]), timpul de descărcare este mai mic – pentru 2 cicluri de frânare 50 secunde, pentru cele 5 cicluri de frânare 125 secunde, deci timpul în care se produce căldură în interiorul celulei este mult mai mic decât în cazul descărcării complete a bateriei cu curent constant. Încălzirea celulei este mai mare, evident, în cazul descărcării acesteia cu curent corespunzător pentru 5 cicluri de frânare, timpul în care se produce căldură fiind mai mare.

În continuare se va testa cazul în care se descarcă celula cu curent corespunzător pentru 5 cicluri de frânare, temperatura inițială fiind de aproximativ 55 °C. În **Fig. 5.41** se pot vedea caracteristicile de variație a temperaturii pe straturile celulei în timpul descărcării:

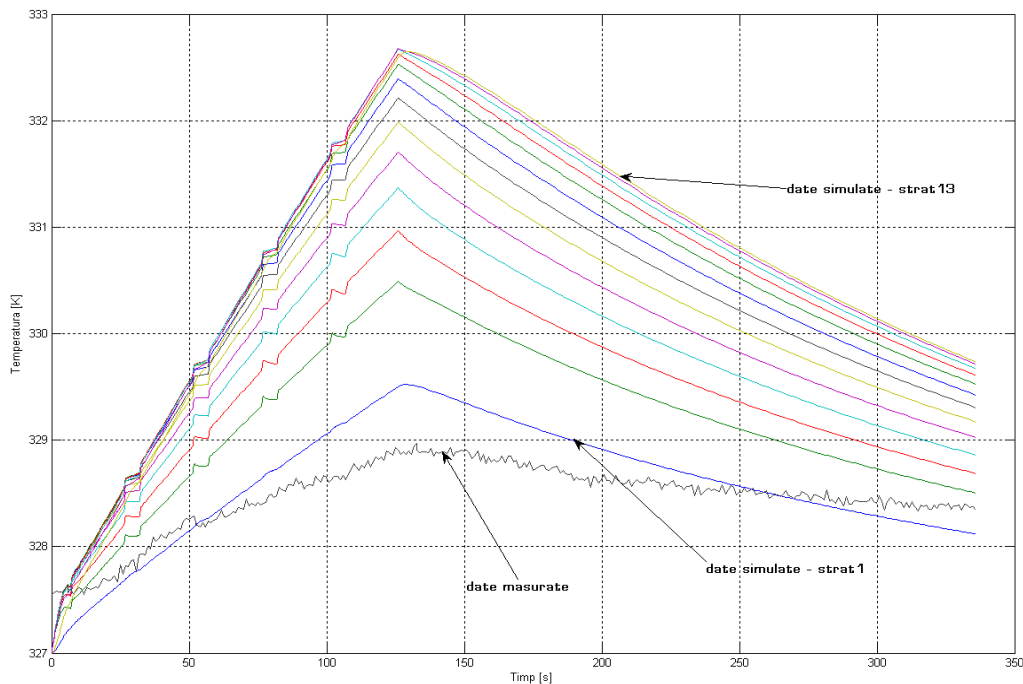


Fig. 5.41 Variația temperaturii pe straturile celulei în timpul descărcării acesteia cu curent corespunzător pentru 5 cicluri de frânare, temperatura inițială aproximativ 55 °C

Curbele tensiunii și curentului celulei în timpul descărcării acesteia cu curent corespunzător pentru 5 cicluri de frânare la temperatura mediului ambiant de 55 °C se pot vedea în **Fig. 5.42**:

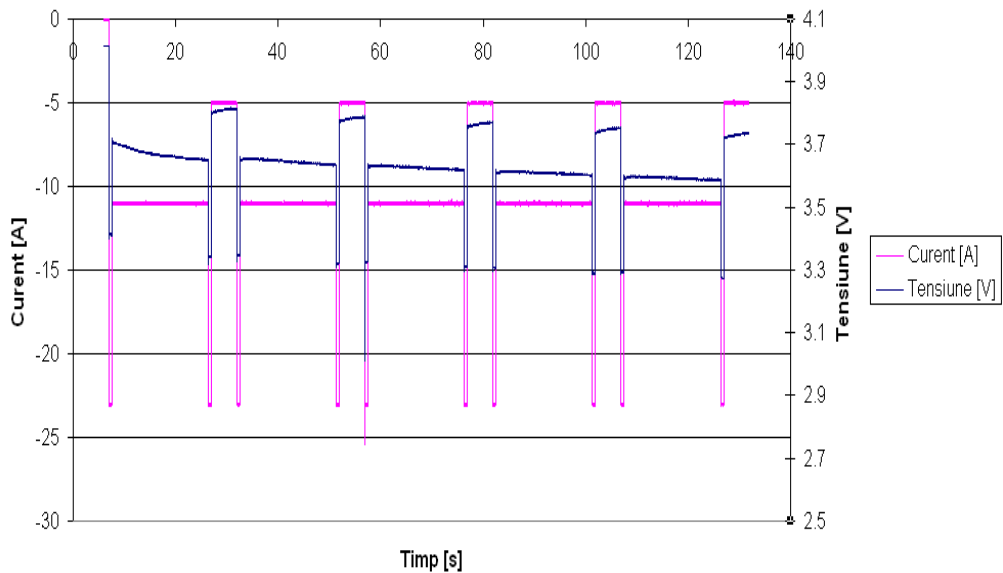


Fig. 5.42 Descărcarea unei celule de tip Li-ion Sony 26650 cu curent corespunzător pentru 5 cicluri de frânare

În acest caz temperatura pe suprafața celulei crește cu aproximativ 2.5 grade, iar în mijlocul celulei cu aproximativ 5.5 grade. Comportarea celulei este asemănătoare cu comportarea la temperatura de 60 °C, încălzirea de ansamblu a celulei este de câteva grade, totuși trebuie evitate temperaturile de 60 °C și peste această valoare pentru a nu accelera procesele de îmbătrânire ale celulei.

În continuare se va studia comportarea termică a celulei când aceasta se descarcă complet cu curent corespunzător ciclurilor de frânare, la temperatura camerei (25 °C). Celula se consideră descărcată complet când tensiunea la bornele ei ajunge la 2.5 [V] în timpul descărcării. Datele măsurate ale tensiunii celulei și curentului celulei se folosesc ca date de intrare pentru modelul termic al celulei și datele măsurate ale temperaturii pe suprafața celulei se compară cu datele rezultate din simularea modelului termic. Pentru modelul termic există în plus posibilitatea calculării temperaturilor pe secțiunea celulei, așa cum s-a făcut și pentru cazurile anterioare. În **Fig. 5.43** se pot vedea graficele de variație a temperaturii pe suprafața celulei și pe straturile interioare ale celulei:

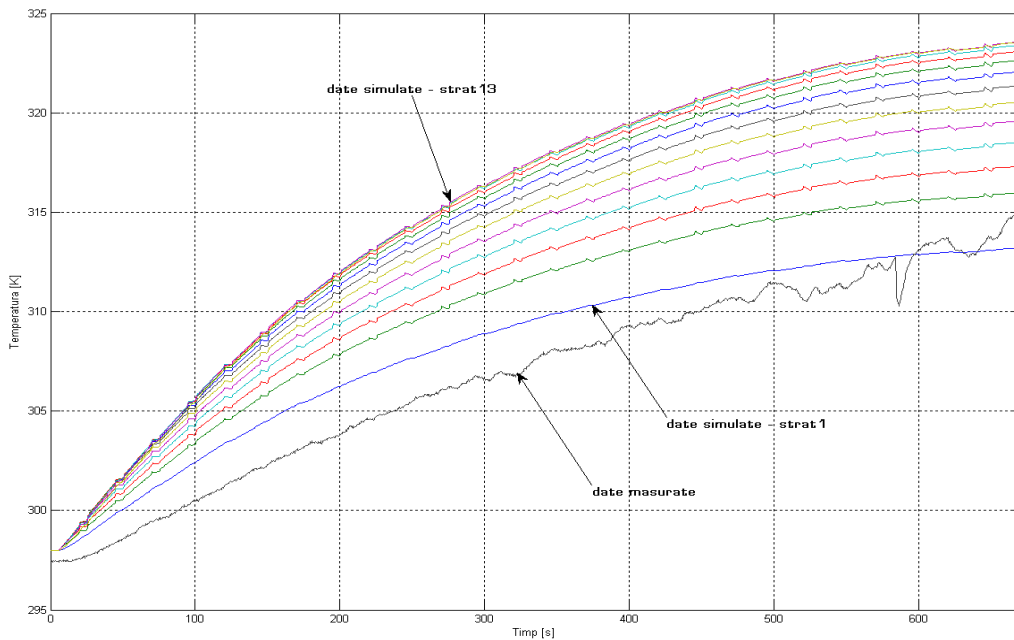


Fig. 5.43 Variația temperaturii pe straturile celulei în timpul descărcării complete a acesteia cu curent corespunzător ciclurilor de frânare, temperatura inițială aproximativ 25 °C

Curbele tensiunii și curentului bateriei corespunzătoare acestui scenariu de testare se pot vedea în **Fig. 5.44**:

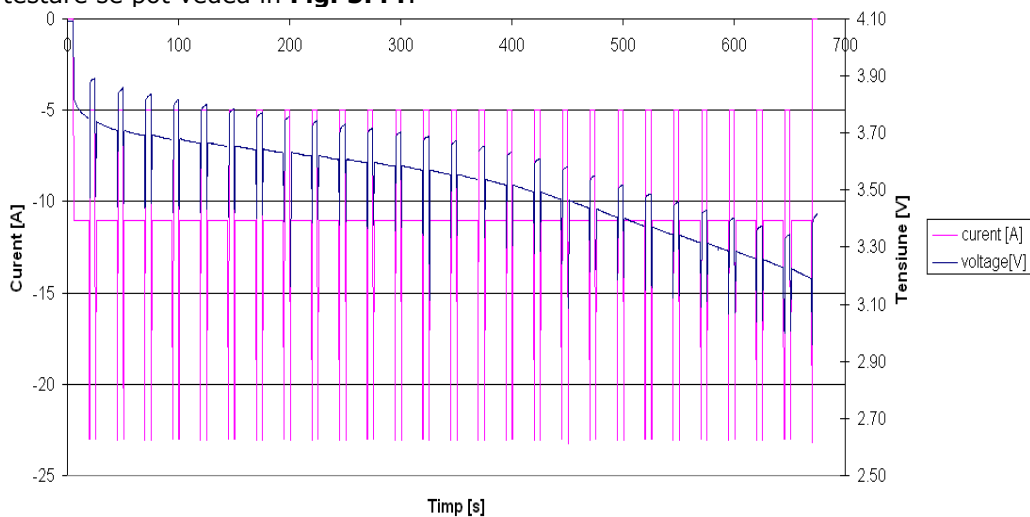


Fig. 5.44 Descărcarea completă a unei celule de tip Li-ion Sony 26650 cu curent corespunzător ciclurilor de frânare

Se observă că temperatura la suprafața celulei crește cu aproximativ 16 grade, iar în interior cu aproximativ 26 grade, creșteri ale temperaturii care sunt semnificative. Trebuie ținut cont de acest aspect în cazul funcționării bateriei în

regim de descărcare cu cicluri de frânare succesive, pentru o perioadă mai lungă de timp, fără să existe pauze în funcționare.

5.4 Concluzii

În acest capitol s-au prezentat modelele termice ale unei celule de tip Li-ion 26650 realizate cu ajutorul programului Matlab/Simulink cu biblioteca de componente Simscape. Acestea au permis modelarea transferului termic în interiorul celulei cu ajutorul elementelor de bibliotecă specifice. De asemenea s-au conceput testele care să verifice rezultatele simulărilor. S-au considerat două situații de încălzire a bateriilor: încălzirea din exterior a acestora cu ajutorul foliilor încălzitoare și autoîncălzirea în timpul procesului de descărcare.

Din datele prezentate mai sus rezultă o foarte bună corelație între datele obținute prin simulare și cele măsurate la suprafața celulei. Atât valorile obținute pentru temperatură cât și timpul după care sunt atinse aceste valori sunt foarte apropiate de datele măsurate în timpul testelor. În cazul autoîncălzirii, temperaturile de pe suprafața exterioară a celulelor măsurate și cele obținute prin simulare, diferă, în valoare absolută, de cele mai multe ori cu cel mult 1 grad. Procentual, diferențele maxime de temperatură, determinate în timpul testelor se situează în jurul valorii de 10%, depinzând de cât de mult se încălzește celula. Pentru cazul încălzirii din exterior a celulelor cu folii încălzitoare se observă, pentru temperatura din centrul celulei, diferențe maxime între valorile simulate și cele măsurate de aproximativ 10 grade, procentual acestea reprezentând aproximativ 20% din încălzirea celulei. Această diferență se datorează și faptului că celula a trebuit modificată pentru măsurarea temperaturii în mijlocul ei, modificare de care modelul termic nu ține cont.

Ipotezele care au stat la baza elaborării modelului termic au fost corecte: distribuția căldurii în interiorul celulei proporțional cu volumul fiecărui strat și datele globale de material. De asemenea, ipotezele simplificatoare nu au modificat semnificativ rezultatele obținute.

Modelul termic astfel realizat poate fi utilizat pentru diferite scenarii de testare a bateriilor: temperaturi inițiale diferite, curenți de descărcare de diferite valori. Se pot estima temperaturile straturilor interioare ale bateriilor din timpul diferitelor procese de descărcare și astfel se pot evita situațiile periculoase în timpul exploatării bateriilor pe durata acestora de funcționare. Aceste rezultate ne vor ajuta în continuare la elaborarea unor strategii de exploatare optimă a bateriilor în scopul de a obține energie la parametrii necesari aplicației alimentate pe toată durata de viață a bateriei și de a prelungi durata de viață a acestora – condiție foarte importantă din punct de vedere economic, având în vedere costul relativ ridicat al bateriilor.

5.5 Bibliografie

- [5.1]. Bergveld H.J., Kruijt W.S and Notten P.H.L, *Battery Management Systems – Design by Modeling*, Kluwer Academic Publishers, 2002.
- [5.2]. Șora I., Golovanov N, ș.a., *Electrotermie și electrotehnologii (Electrothermics and Electrotechnologies)*, vol.I, Editura Tehnica, 1997
- [5.3]. Linden D., Reddy T.B., *Handbook of Batteries*, third edition, McGraw-Hill, 2002;

-
- [5.4]. Pesaran A, *Battery Thermal Management in EVs and HEVs: Issues and Solutions*, Advanced Automotive Battery Conference, 2001;
- [5.5]. Trăistaru A., Şora I., *Thermal Management of Li-ion Battery in Low Temperature Environment*, Scientific Bulletin of the "Politehnica" University of Timisoara, Romania, Transactions on Power Engineering, Proceedings of the 11th Timisoara Academic Days Conference, May 28-29, 2009, Timisoara, Romania;
- [5.6] Trăistaru A., Şora I., *Studies Concerning Li-ion Battery Thermal Behaviour in Low Temperature Environment*, Journal of Electrical Engineering, 2009
- [5.7]. Trăistaru A., Andree D., Avram I, *Li-ion Battery Management Concept for Dry-by-wire Systems*, *International Automotive Electronics Congress*, Proceedings of the International Automotive Electronics Congress, Paris 2008;
- [5.8] The Electronic Wedge Brake Compendium, 2007;

6. Concluzii generale și contribuții personale

Teza abordează problematica diagnosticării în timp real a sistemelor de stocare a energiei electrice utilizate în industria auto. Pentru aplicația de frână electrică s-au ales ca sisteme de rezervă pentru stocarea energiei electrice bateriile de tip Li-ion SONY 26650. Având în vedere importanța aplicației pe care acestea o alimentează, este necesar să existe un algoritm precis și sigur pentru diagnosticarea în timp real a acestor baterii de rezervă. O altă problemă abordată este aceea a managementului termic al acestor tipuri de baterii. Cunoșcând faptul că tehnologia Li-ion, care stă la baza funcționării acestor baterii, are un domeniu de temperatură destul de restrâns: sub -20°C bateriile nu pot furniza energie electrică, iar peste 60°C există riscul deteriorării rapide, cu consecințe potențial periculoase, după cum avertizează producătorul, este necesară găsirea unor soluții pentru aducerea acestor baterii în plaja de valori ale temperaturii care le asigură o funcționare optimă fără a le afecta negativ durata de viață.

Pe baza rezultatelor teoretice și experimentale prezentate în această teză se pot trage următoarele concluzii principale:

- Bateriile care au la bază tehnologia Li-ion au cea mai mare densitate masică și volumică de energie comparativ cu celelalte tipuri de baterii secundare și din acest motiv sunt preferate ca sisteme de rezervă pentru stocarea energiei electrice utilizate în industria auto;

- Datorită importanței aplicației pe care acestea o alimentează este necesar un algoritm de diagnosticare în timp real precis și sigur care să estimeze parametrii bateriei în fiecare moment în timpul funcționării automobilului;

- Parametrii bateriei estimați în timp real: starea de încărcare momentană, rezistența internă și capacitatea utilă maximă și metodele lor de calcul s-au stabilit în strânsă legătură cu caracteristicile și cerințele aplicației de frână electrică. De exemplu rezistența internă a bateriei este în strânsă corelație cu profilul curbei de curent de descărcare corespunzător unui ciclu de frânare.

- Prin parametrii pe care îi estimează, algoritmul de diagnosticare decide dacă bateria este capabilă să furnizeze aplicației de frână electrică energie la parametrii ceruți de aceasta. Algoritmul se referă strict la cerințele pe care trebuie să le îndeplinească bateria în raport cu aplicația alimentată.

- Pe baza tabelelor cu valori fixe (look-up tables) algoritmul poate adapta / recalcula valorile parametrilor obținuți în condițiile actuale (rezistență internă, capacitate utilă maximă) la alte condiții de funcționare a bateriilor (curenți de descărcare diferiți, temperaturi diferite);

- Rezultatele au arătat o foarte bună corelație între estimările făcute de algoritmul de diagnosticare pe baza datelor de intrare: tensiune, curent și temperatura bateriei cu datele obținute în urma testelor efectuate, pentru toți parametrii bateriilor. O atenție specială trebuie acordată parametrului capacitate maximă datorită timpului necesar pentru ca bateria să ajungă în stare de echilibru după proba de descărcare;

- În urma rezultatelor experimentale care s-au prezentat în Cap.4 s-a evidențiat necesitatea studierii bateriilor din punct de vedere termic și a elaborării unei strategii de management termic a acestora. Acest lucru presupune înțelegerea

dinamicii fenomenelor care se petrec la diferite temperaturi în timpul funcționării bateriilor și elaborarea unor măsuri pentru exploatarea acestora în condiții optime;

- Modelele termice propuse pentru a modela comportarea termică a bateriilor cilindrice Li-ion s-au elaborat luând în considerare două situații: încălzirea acestora din exterior cu ajutorul foliilor încălzitoare și autoîncălzirea datorită descărcării.

- Rezultatele experimentale au confirmat ipotezele care au stat la baza elaborării modelelor termice ale bateriilor și au arătat că simplificările considerate nu au afectat semnificativ rezultatele obținute prin simulare. Pentru toate scenariile de testare a modelului termic luate în considerare, rezultatele obținute în urma simulării au fost foarte apropiate de cele obținute în urma testelor atât în ceea ce privește valorile de temperatură pe suprafața bateriei și în mijlocul acesteia, cât și pentru momentele de timp când se ating aceste valori.

Contribuțiile personale ale autoarei sunt:

- Prezentarea unei sinteze privind variantele existente de acumulate electrice și compararea performanțelor acestora;

- Stabilirea parametrilor bateriei care evidențiază cel mai clar, pentru aplicația alimentată, starea în care se găsește bateria în fiecare moment precum și metodele de calcul ai acestora;

- Elaborarea unui algoritm de diagnosticare în timp real a bateriilor de tip Li-ion care cuprinde: estimarea stării de încărcare momentane a bateriei, estimarea rezistenței interne și a capacității utile maxime a bateriei. Pe baza acestor parametrii algoritmul decide dacă bateria este capabilă sau nu să furnizeze energie la parametrii ceruți de aplicația de frână electrică la automobile;

- Implementarea acestui algoritm de diagnosticare utilizând programul Matlab/Simulink cu mediul SDA;

- Conceperea și realizarea strategiilor și scenariilor de testare a bateriilor pentru verificarea experimentală a soluțiilor propuse;

- Realizarea programelor de comandă a sarcinii electronice și achiziție a datelor de la baterii cu ajutorul instrumentelor virtuale (IV) realizate cu programul LabView;

- Elaborarea modelelor termice ale celulei cilindrice Li-ion pentru două cazuri luate în considerare: încălzirea celulei din exterior cu folie încălzitoare și autoîncălzirea acesteia în timpul proceselor de descărcare;

- Implementarea acestor modele termice utilizând programul Matlab/Simulink cu bibliotecile de componente Simscape;

- Conceperea și realizarea scenariilor de testare pentru verificarea experimentală a modelelor termice propuse și a ipotezelor care au stat la baza elaborării acestora;

- Sintetizarea rezultatelor obținute în urma testelor;

CURRICULUM VITAE

Data și locul nașterii: 12.08.1972, Arad

Studii: 1996 – Diplomă Master în domeniul Echipamente pentru Electrotehnologii și Aparate Electrice, Facultatea de Electrotehnică, Universitatea "Politehnica" Timișoara;

1995 – Diplomă de licență în domeniul Aparate Electrice și Electrotehnologii, Facultatea de Electrotehnică, Universitatea "Politehnica" Timișoara;

Experiență profesională:

2005 – prezent – inginer, Continental Automotive Romania S.A., Departamentul Chassis & Safety, Sisteme Electronice de Frânare;

Domenii de interes: diagnosticarea și managementul în timp real al sistemelor de stocare a energiei electrice utilizate în aplicații din industria auto; managementul termic și studierea comportării termice a bateriilor de tip Li-ion; implementarea algoritmilor în sisteme dedicate industriei automobilelor;

Participare conferințe:– European Symposium on Electrochemical Engineering, CHISA Praga 2008; International Automotive Electronics Congress IAEC Paris 2008; Zilele Academice Timișene, Timișoara 2009.

1996 – 2005 – asistent universitar, Catedra Mașini, Acționări și Utilizări Electrice, Facultatea de Electrotehnică, Universitatea "Politehnica" Timișoara;

Octombrie 2001 - înscrisă la stagiul de pregătire doctorat;

Domenii de interes: încălzirea în câmp electromagnetic, simulare/modelare procese/echipamente electrotermice utilizând diferite modele matematice și programe specializate;

01.Apr.2002-15.Mai.2002 - bursa de studii, Technische Universitaet Muenchen, Lehrstuhl fur Messsystem und Sensortechnik;

1998 – 2000 – participare la două proiecte de cercetare în domeniul simulării unor procese electromagnetice și termice din domeniul încălzirii prin inducție electromagnetică, beneficiar: Ministerul Cercetării și Tehnologiei.

Lucrări publicate

- [1] Trăistaru A., Andree D., Avram I., *Diagnosis of Li-ion Batteries Used for Power Application in the Automotive Industry*, Proceedings of the 8th European Symposium on Electrochemical Engineering, pp.194–208, Prague 2008;
- [2] Trăistaru A., Andree D., Avram I., *Li-ion Battery Management Concept for Dry-by-wire Systems*, International Automotive Electronics Congress, Paris 2008;
- [3] Trăistaru A., Şora I., *Aspects Concerning Real Time Determination of Li-ion Battery State of Charge and Other Parameters*, Proceedings of the 11th Timisoara Academic Days Conference, Scientific Bulletin of the "Politehnica" University of Timisoara, Romania, Transactions on Power Engineering, Special issue, ISSN 1582-7194, May 28-29, 2009, Timisoara, Romania;
- [4] Trăistaru A., Şora I., *Thermal Management of Li-ion Battery in Low Temperature Environment*, Proceedings of the 11th Timisoara Academic Days Conference, Scientific Bulletin of the "Politehnica" University of Timisoara, Romania, Transactions on Power Engineering, Special issue, ISSN 1582-7194, May 28-29, 2009, Timisoara, Romania;
- [5] Trăistaru A., Şora I., *Studies Concerning Li-ion Battery Thermal Behaviour in Low Temperature Environment*, Journal of Electrical Engineering, "Politehnica" Publishing House, ISSN 1582-4594, "Politehnica" University of Timisoara - acceptat pentru publicare, 2009;
- [6] Trăistaru A., Şora I., *Real Time Estimation of Li-ion Battery Resistance Used in the Automotive Industry*, Journal of Electrical Engineering, "Politehnica" Publishing House, ISSN 1582-4594, "Politehnica" University of Timisoara - acceptat pentru publicare, 2010;