

Universitatea POLITEHNICA din Bucureşti  
Facultatea de Electronică, Telecomunicații și Tehnologia Informației

**Sistem de monitorizare al bateriilor pentru aplicații de  
tensiuni joase**

**Proiect de Diplomă**

Prezentat ca cerință parțială pentru obținerea  
titlului de *Inginer*  
în domeniul *Electronică și Telecomunicații*  
programul de studii *Tehnologii și Sisteme de Telecomunicații*

**Conducători științifici**  
Ş.L. Dr. Ing. Bîră Călin  
Ing. Ioan-Cristian Durlă

**Absolvent**  
Micu Petru

**Anul 2023**



## **Declarație de onestitate academică**

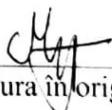
Prin prezenta declar că lucrarea cu titlul “Sistem de monitorizare al bateriilor pentru aplicații de tensiuni joase”, prezentată în cadrul Facultății de Electronică, Telecomunicații și Tehnologia Informației a Universității “Politehnica” din București ca cerință parțială pentru obținerea titlului de Inginer în domeniul Inginerie electronică, telecomunicații și tehnologii informaționale, programul de studii Tehnologii și sisteme de telecomunicații este scrisă de mine și nu a mai fost prezentată niciodată la o facultate sau instituție de învățămînt superior din țară sau străinătate.

Declar că toate sursele utilizate, inclusiv cele de pe Internet, sunt indicate în lucrare, ca referințe bibliografice. Fragmentele de text din alte surse, reproduse exact, chiar și în traducere proprie din altă limbă, sunt scrise între ghilimele și fac referință la sursă. Reformularea în cuvinte proprii a textelor scrise de către alți autori face referință la sursă. Înțeleg că plagiatul constituie infracțiune și se sancționează conform legilor în vigoare.

Declar că toate rezultatele simulărilor, experimentelor și măsurătorilor pe care le prezint ca fiind făcute de mine, precum și metodele prin care au fost obținute, sunt reale și provin din respectivele simulări, experimente și măsurători. Înțeleg că falsificarea datelor și rezultatelor constituie fraudă și se sancționează conform regulamentelor în vigoare.

București, iulie 2023

Absolvent *Micu Petru*

  
(semnătura în original)



**TEMA PROIECTULUI DE DIPLOMĂ**  
a studentului MICU T. Petru, 442C

**1. Titlul temei:** Sistem de monitorizare a bateriilor pentru aplicatii de tensiuni joase

**2. Descrierea temei și a contribuției personale a studentului (în afara părții de documentare):**

Proiectarea unui sistem de monitorizare pentru diverse aplicatii care folosesc baterii de joase tensiuni (bateria de 12V a masinii, e-bikes, e-scooters, drones, etc.).

Sistemul este alcătuit din microcontroller-ul S32K344 care comunica cu circuitul integrat MC33772C prin protocolul de comunicatie SPI (Serial Peripheral Interface) si o aplicatie de nivel inalt care ofera utilizatorului o vizualizare grafica a parametrilor celulelor bateriei care sunt puse la dispozitie de microcontroller prin Ethernet.

Pentru integrarea in aplicatii automotive, parametrii celulelor vor putea fi puse la dispozitie si prin protocolul CAN.

Se va scrie driver-ul pentru comunicarea cu circuitul integrat MC33772C prin SPI, aplicatia care controleaza masuratorile tensiunilor, currentilor si a temperaturilor si comunicatia cu aplicatia de nivel inalt, cat si aplicatia care comunica cu microcontroller-ul si efectueaza calcule complexe pe baza datelor primite (State of Charge, State of Health).

**3. Discipline necesare pt. proiect:**

PC, SDA, OOP, DCE

**4. Data înregistrării temei:** 2023-03-31 20:11:56

**Conducător(i) lucrare,**  
Ş.L.Dr.Ing. Călin BÎRĂ

**Student,**  
MICU T. Petru

Cristian Durla, NXP

**Director departament,**  
Conf. dr. ing. Șerban OBREJA

**Decan,**  
Prof. dr. ing. Mihnea UDREA

Cod Validare: **81d0579c0e**



# Cuprins

<b>Lista figurilor . . . . .</b>	<b>3</b>
<b>Lista tabelelor . . . . .</b>	<b>5</b>
<b>Lista acronimelor . . . . .</b>	<b>7</b>
<b>Introducere . . . . .</b>	<b>7</b>
<b>1. Viitorul mobilității . . . . .</b>	<b>11</b>
<b>2. Fundamente teoretice . . . . .</b>	<b>13</b>
2.1. Caracteristici ale bateriilor . . . . .	13
2.2. Battery Management System . . . . .	14
2.3. Monitorizarea bateriei . . . . .	14
2.3.1. Măsurarea curentului . . . . .	14
2.3.2. Măsurarea temperaturii . . . . .	15
2.4. Protecția bateriei . . . . .	16
2.4.1. Monitorizarea tensiunii . . . . .	17
2.4.2. Monitorizarea curentului . . . . .	17
2.4.3. Monitorizarea și controlul temperaturii . . . . .	17
2.5. Gestionarea capacitatei . . . . .	18
2.5.1. State of Charge . . . . .	18
2.5.2. State of Health . . . . .	21
2.5.3. Echilibrarea celulelor . . . . .	21
<b>3. Resurse hardware . . . . .</b>	<b>25</b>
3.1. Microcontrolerul S32K344 . . . . .	25
3.1.1. Placa de dezvoltare S32K3X4EVB-Q257 . . . . .	26
3.2. Emulatorul de baterii BAT6-EMULATOR . . . . .	26
3.3. Integratul MC33772C . . . . .	27
3.3.1. Sistemul complet . . . . .	28
<b>4. Resurse software . . . . .</b>	<b>29</b>
4.1. Mediul de dezvoltare S32 Design Studio . . . . .	29
4.2. Pachetul software Real Time Drivers . . . . .	29
4.3. Pachetul software Battery Management System . . . . .	30
4.3.1. Protocolul Transport Physical Layer . . . . .	30
4.3.2. Descriptorii de tranzacție - Transaction Descriptors . . . . .	31
4.3.3. FreeRTOS . . . . .	32
4.3.4. FreeMASTER . . . . .	32

<b>5. Detalii de implementare</b>	33
5.1. Driverul Bms_SpiIf	33
5.2. Aplicația Low Voltage BMS	37
5.2.1. Interfața grafică	38
5.2.2. Implementarea BMS	40
5.2.3. Inițializarea sistemului	43
5.2.4. Măsurarea tensiunilor, curentului și temperaturii	45
5.2.5. Algoritmul pentru determinarea SoC și SoH	46
5.2.6. Detectia supratensiunilor și subtensiunilor	50
5.2.7. Controlul sistemului	52
5.2.8. Echilibrarea celulelor	53
<b>6. Contribuții personale</b>	55
<b>Concluzii</b>	57
<b>Bibliografie</b>	59

## Lista figurilor

1.1.	Mobilitatea în 2022 împărțită în funcție de modul de transport . . . . .	11
1.2.	Evoluția pieței micromobilității . . . . .	12
2.1.	Baterie litiu-polimer . . . . .	13
2.2.	Baterie litiu-ion . . . . .	13
2.3.	Măsurarea tipică a curentului . . . . .	15
2.4.	Măsurarea tipică a temperaturii . . . . .	15
2.5.	Variată tipică a capacității și tensiunii în funcție de curent și temperatură . . . .	19
2.6.	Comportamentul celulelor neechilibrate în timpul încărcării și descărcării . . . .	21
2.7.	Echilibrarea pasivă a celulelor . . . . .	22
2.8.	Echilibrarea activă a celulelor . . . . .	23
3.1.	Perifericele folosite și rolul acestora . . . . .	25
3.2.	Placa de dezvoltare S32K3X4EVB-Q257 . . . . .	26
3.3.	Emulatorul de baterii cu 6 celule, BATT6-EMULATOR . . . . .	26
3.4.	Placa de dezvoltare FRDM33772CSPEVB . . . . .	28
3.5.	Sistemul hardware interconectat . . . . .	28
4.1.	Formatul Transport Protocol Layer . . . . .	30
4.2.	Construcția unui descriptor de tranzacție . . . . .	31
5.1.	Diagrama de stare a driverului Bms_SpiIf . . . . .	33
5.2.	Interfața de configurare a componentei Bms_SpiIf pentru un singur dispozitiv TPL2 . . . . .	34
5.3.	Modul de funcționare a componentei Bms_SpiIf . . . . .	35
5.4.	Modul de funcționare a componentei Bms_SpiIf . . . . .	35
5.5.	Gestionarea mesajelor interne Bms_SpiIf cu CADD = 0 . . . . .	36
5.6.	Diagrama block a sistemului . . . . .	37
5.7.	Interfața grafică . . . . .	38
5.8.	Scenarii posibile în timpul unei defectiuni . . . . .	39
5.9.	Proiectarea bateriei de 24V a trotinetei electrice . . . . .	40
5.10.	Pagina de configurare a driverului Bcc_772c . . . . .	41
5.11.	Configurarea descriptorilor de transmisie în pagina de configurare a driverului Bms_common . . . . .	41
5.12.	Execuția aplicației Low Voltage Battery Management System . . . . .	42
5.13.	Procesul de inițializare al sistemului Low Voltage Battery Management System .	43
5.14.	Procesul de configurare al sistemului împreună cu integratul MC33772C . . . .	44
5.15.	Măsurarea și calculul parametrilor celulelor . . . . .	45
5.16.	Curba de variație OCV - SoC a celulei SAMSUNG 30Q INR18650 . . . . .	47
5.17.	Cadrele CPL împachetate pentru măsurarea inițială a tensiunilor . . . . .	47
5.18.	Principiul de funcționare al numărătorului de Coulombi . . . . .	48
5.19.	Algoritmul folosit pentru determinarea sarcinii electrice . . . . .	49
5.20.	Algoritmul folosit pentru determinarea stărilor de încărcare (SoC) și de sănătate (SoH) . . . . .	49

5.21. Configurația cauzelor ce determină tranziții ale pinului FAULT al integratului MC33772C . . . . .	50
5.22. Execuția sarcinii LVBMS_FaultHandlerTask în timpul unei defectiuni . . . . .	51
5.23. Efectul defectiunii detectate în interfața grafică . . . . .	51
5.24. Decuplarea bateriei comandată de BMS . . . . .	52
5.25. Principele de funcționare al algoritmului de echilibrare al celulelor . . . . .	53
5.26. Principele de echilibrare pentru celulele avariate . . . . .	53
5.27. Comportamentul de echilibrare unei celule prea descărcate . . . . .	54

## **Lista tabelelor**

5.1. Specificațiile acumulatorilor SAMSUNG 30Q INR18650 . . . . . 40



## **Lista acronimelor**

Li-Ion - Litiu-ion

BMS - Battery Management System

LVBMS - Low Voltage Battery Management System

TPL - Transport Protocol Layer

TD - Transaction Descriptor

BCC - Battery Cell Controller

CC - Coloumb Counting

MCU - Microcontroller Unit

GPIO - General Purpose Input Output

ADC - Analog to Digital Converter

SPI - Serial Peripheral Interface

UART - Universal Asynchronous Receiver/Transmitter

CAN - Controller Area Network

LIN - Local Interconnect Network

GPT - General Purpose Timer

ICU - Input Capture Unit

SoC - State of Charge

SoH - State of Health

DoD - Depth of Discharge

NTC - Negative Temperature Coefficient

PTC - Positive Temperature Coefficient

MOSFET - Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor

NOP - No OPeration

AUTOSAR - AUtomotive Open System ARchitecture

S32DS - S32 Design Studio

OV - Over Voltage

UV - Under Voltage

LSB - Least Significant Bit

OCV - Open Circuit Voltage

CT - Cell Terminal

TSA - Target-Side Addressing

RTOS - Real Time Operating System

EEPROM - Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory

LED - Light Emitting Diode

IoT - Internet of Things

DMA - Direct Memory Access

RAM - Random Access Memory



# Introducere

## Motivatie

Cererea globală a bateriilor este în continuă creștere, fiind alimentată în principal de inițiativele de încetinire a încălzirii globale prin electrificarea metodelor clasice de mobilitate. Folosirea bateriilor Li-Ion (litiu-ion) în favoarea altor tehnologii de stocare a energiei devine tot mai populară, estimându-se o creștere anuală a pieței cu aproximativ 25% până la atingerea valorii de 400 de miliarde de dolari în 2030 [1].

Printre avantajele tehnologiei Li-Ion se numără greutatea redusă, facilitând portabilitatea și îmbunătățirea dispozitivelor mobile, densitatea energetică ridicată ce permite stocarea unei cantități mari de energie într-un volum mic și timpul de încărcare mai scurt decât în cazul altor tehnologii.[2]

Cu toate acestea, bateriile Li-Ion prezintă și o serie de dezavantaje. Pe lângă costurile ridicate de fabricație, celulele suferă de îmbătrânire, durata de viață a acestora fiind dependentă de numărul de ciclii de încărcare/descărcare, dar și de condițiile de operare. Mai mult decât atât, acestea pot deveni instabile termic, intrând într-o stare de auto-încălzire necontrolată ce poate rezulta în temperaturi foarte ridicate urmate de fum, foc și chiar explozii. Pentru combaterea acestor probleme și folosirea în condiții de siguranță este necesar un sistem de protecție pentru menținerea bateriilor în condiții optime de operare.[3]

Așadar, pentru a putea integra bateriile Li-Ion în noile tehnologii ce vor revoluționa multe sectoare industriale, este necesar un sistem de monitorizare și control al bateriilor (BMS).

## Scopul lucrării

Lucrarea de față are ca scop realizarea unui sistem integrat pentru monitorizare și control al bateriilor cu până la 6 celule Li-Ion. Astfel sistemul poate fi folosit pentru dispozitive care necesită alimentarea cu până la 24V (bateria de 12V a autovehiculelor hibride, bateriile bicicletelor și scuterelor electrice, bateriile dronelor).

Sistemul a fost realizat folosind soluțiile hardware și software dezvoltate de către compania NXP Semiconductors la care s-a adăugat contribuția proprie asupra pachetului software BMS (capitolul 4.3), ajutând astfel la dezvoltarea soluției pentru sistemele dedicate aplicațiilor de joasă tensiune, precum dispozitivele folosite în sectorul de micromobilitate.

Pentru a ușura analiza celulelor Li-Ion, datele furnizate de către sistemul de monitorizare vor fi comunicate unei aplicații de diagnoză ce dispune de o interfață grafică și oferă control minim pentru simularea funcționării unei trotinete electrice. BMS va furniza măsurătorile și stările celulelor prin intermediul unui protocol de comunicație serial. A fost ales protocolul UART deoarece placa de dezvoltare folosită dispune de un integrat ce realizează conversia UART-USB, oferind o metodă ușoară pentru conexiunea cu aplicația de depanare.

## Prezentarea soluției NXP

NXP Semiconductors este unul dintre liderii industriei semiconductoarelor și oferă soluții avansate pentru multiple sectoare industriale, cum ar fi automotive, securitate, Internet of Things și RADAR. Printre soluțiile dezvoltate de această companie se numără și cele folosite în această lucrare.[4]

Circuitul de monitorizare are la bază circuitul integrat MC33772C ce dispune de 6 canale de măsură pentru tensiuni, permitând monitorizarea a până la 6 celule Li-Ion. Controlul acestui integrat este realizat de către microcontrolerul S32K344 care comunică prin intermediul interfeței SPI (Serial Peripheral Interface) cu acesta.

Deoarece dezvoltarea și testarea unui BMS folosind celule Li-Ion reale reprezintă procese periculoase, celulele vor fi înlocuite cu un emulator de baterii cu 6 canale BATT-6EMULATOR ce permite modificarea individuală a tensiunii fiecarei celule cât și varierea curentului emulat. Descrierea resurselor hardware utilizate este detaliată în capitolul 4.

Aplicația grafică a fost realizată folosind programul FreeMASTER, un monitor dezvoltat de NXP Semiconductors pentru depanarea în timp real a sistemelor integrate. FreeMASTER facilitează interacțiunea cu sistemele integrate furnizând dezvoltatorilor software un mediu pentru vizualizarea și configurarea parametrilor de interes.

## Structura lucrării

**Capitolul 1 - Viitorul mobilității** - explorează piața bateriilor Li-Ion, trendurile și tehnologiile ce vor juca un rol important în reforma mobilității.

**Capitolul 2 - Fundamente teoretice** - prezintă bazele teoretice ale bateriilor și sistemelor de gestionare ale acestora. Conceptele discutate în acest capitol sunt elementare pentru studiul unui BMS, înglobând atât problemele cu care se confruntă sistemul, cât și soluțiile existente.

**Capitolul 3 - Resurse hardware** - descrie platformele hardware utilizate pentru implementarea părții practice ale acestei lucrări, analizând rolul acestora în sistem.

**Capitolul 4 - Resurse software** - prezintă mediul de dezvoltare folosit, pachetele software utilizate și rolul lor în designul propus. În acest capitol se explorează concepte cheie folosite în descrierea comunicației dintre microcontroler și integratul MC33772C.

**Capitolul 5 - Detalii de implementare** - descrie detalii tehnice ale lucrării practice, designul ales, funcțiile suportate de aplicație și modul în care aceasta a fost implementată.

**Capitolul 6 - Contribuții personale** - sunt prezentate contribuții personale într-o manieră cronologică pentru a demonstra evoluția în timp a proiectului.

# Capitolul 1

## Viitorul mobilității

Ne aflăm în mijlocul unei reforme a mobilității clasice, fiind tot mai comună alegerea unui autovehicul hibrid sau electric în favoarea unuia cu motor termic. Posibilitatea acestei tranzitii este datorată eforturilor companiilor care au investit în transformarea transportului clasic, oferind promisiunea optimistă a unui viitor mai verde.

În ciuda eforturilor de a promova alternative de mobilitate ce nu produc emisii, predomină încă vehiculele clasice. Numărul mare al autovehiculelor personale sunt una dintre cauzele principale ale poluării din orașele mari, dar și a traficului intens ce a determinat tot mai multe persoane să adopte munca de acasă pentru a salva timpul pentru naveta zilnică. Conform scorului global al traficului realizat de INRIX în anul 2022, București este pe locul al 19-lea global când vine vorba de orele pierdute în trafic, bucureștenii pierzând anual 91 de ore în spatele volanului. Pe primul loc este Londra cu un număr de 156 de ore pierdute în trafic [5].

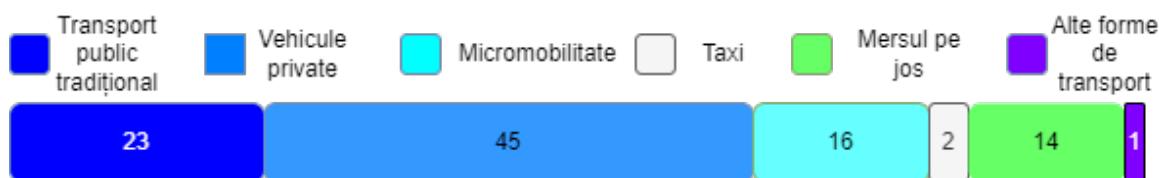


Figura 1.1: Mobilitatea în 2022 împărțită în funcție de modul de transport  
Sursa:<https://www.mckinsey.com/industries/automotive-and-assembly/our-insights/the-future-of-mobility-mobility-evolves>

Conform figurii 1.1, cel mai popular mod de transport este vehiculul propriu, însă nu este de neglijat procentul persoanelor ce folosesc biciclete, trotinete și scutere electrice sau alte metode de micromobilitate. Micromobilitatea reprezintă un segment al pieței relativ nou care crește rapid, dimensiunea sa la nivel global fiind de aproximativ 180 miliarde de dolari. Conform analizelor, se estimează că dimensiunea acestui sector va atinge valoarea de 440 de miliarde de dolari până în anul 2030.[6]

În orașele mari devin tot mai populare trotinetele și bicicletele alimentate de baterii, fiind puse la dispoziție de către diverse companii pentru a fi folosite contra cost. Aceste dispozitive sunt prietenoase cu mediul, fiind complet electrice, și facilitează transportul evitând traficul și reducând timpul pierdut pentru deplasare. Dezavantajul lor este distanța scurtă pe care o pot parcurge până când bateria trebuie încărcată din nou. Cu toate acestea, se continuă cercetarea pentru îmbunătățirea tehnologiilor curente, iar soluțiile actuale la această problemă pot fi amplasarea stațiilor de încărcare în apropierea zonelor de interes și folosirea eficientă a bateriei pentru a folosi la maxim potențialul acesteia.

Când vine vorba de domeniul micromobilității, dezvoltarea sistemulelor BMS va deveni tot mai importantă, iar soluțiile NXP Semiconductors acoperă foarte bine nevoia aceasta. Trendul

sectorului de micromobilitate se îndreaptă către electrificarea vehiculelor de dimensiuni mici precum trotinetele, scuterele și bicicletele electrice, dispozitive realizate cu ajutorul bateriilor, în special a celor realizate în tehnologia Li-Ion. Astfel, creșterea pieței micromobilității determină o creștere a cererii bateriilor Li-Ion și implicit și o nevoie mai mare a sistemelor BMS performante.

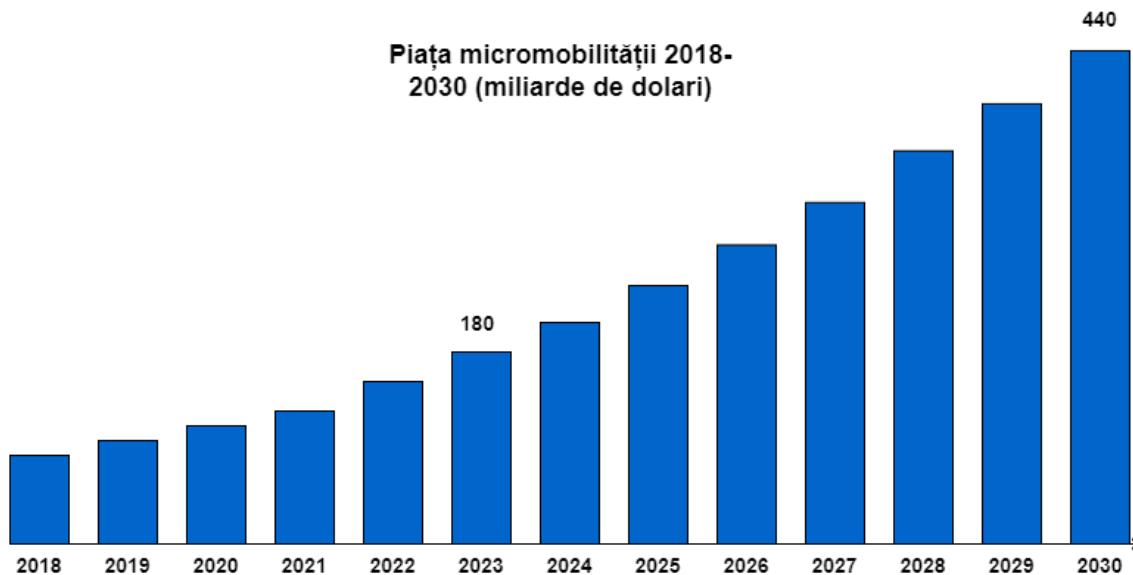


Figura 1.2: Evoluția pieței micromobilității

Sursa:<https://www.mckinsey.com/industries/automotive-and-assembly/our-insights/the-future-of-mobility-mobility-evolves>

## Capitolul 2

### Fundamente teoretice

#### 2.1 Caracteristici ale bateriilor

Fiecare baterie este confectionată diferit, aşadar, înainte de folosire este necesară studierea foii de catalog publicată de fabricant. În foia de catalog se vor găsi specificații importante pentru modul de lucru recomandat. Cele mai importante caracteristici sunt descrise mai jos.



Figura 2.1: Baterie litiu-polimer



Figura 2.2: Baterie litiu-ion

**Tensiunea nominală** pentru tehnologia Li-Ion este tipic 3,7V. Această valoare reprezintă tensiunea medie a bateriei, domeniul de tensiuni tipic permis fiind 2,75V-4,2V. Limitele acestui domeniu reprezintă tensiunea minimă, respectiv tensiunea maximă a celulei, consecința părăsirii acestui interval fiind deteriorarea celulei.

**Curentul de încărcare maxim** reprezintă curentul continuu maxim ce poate fi suportat de baterie în timpul încărcării. În general, se precizează și curentul maxim ce poate fi suportat de baterie pentru o perioadă scurtă de timp, fără a risca deteriorarea. Asemănător se definesc și curentii de descărcare maximi. Nerespectarea limitelor impuse de producător poate avea consecințe grave asupra siguranței.

**Capacitatea nominală** reprezintă capacitatea bateriei de a furniza un curent pentru un anumit timp, iar unitatea de măsură este Ah (Ampere-hour). De exemplu, o baterie care are capacitatea nominală egală cu  $C = 3400mAh$  va putea furniza constant un curent continuu egal cu  $I = 3400mA$  timp de o oră.

**C-Rate** reprezintă o măsură a curentului, fie de descărcare sau încărcare, raportat la capacitatea bateriei. De exemplu, o rată de descărcare de  $1C$  permite descărcarea bateriei de capacitate  $C = 3400mAh$  cu un curent  $I = 3400mA$  timp de o oră, după care bateria va fi complet descărcată. Pentru aceeași capacitate, o rată de  $2C$  va descărca bateria de două ori mai repede, cu un curent dublu  $I = 6800mA$ .

Este comun ca fabricantul să prezinte în foaia de catalog grafice ce descriu comportamentul bateriei în diferite condiții, variații ale tensiunii în funcție de temperatură sau capacitate, variații ale rezistenței interne, variația capacității cu numarul de ciclii de încărcare/descărcare.

## 2.2 Battery Management System

BMS este o tehnologie dedicată monitorizării unei baterii formată dintr-un ansamblu de celule organizate electric sub forma unei matrici pentru a permite furnizarea unui domeniu de tensiuni și curenți pentru un anumit interval de timp.[7]

Întrucât complexitatea unui BMS este puternic dependentă de cerințele sistemului în care este integrat, nu există un set de funcții predefinite pe care sistemul trebuie să le îndeplinească. Cu toate acestea, există două funcții ce sunt considerate esențiale: monitorizarea stării bateriei și protecția bateriei. Îndeplinind cu succes aceste două funcții nu numai că se garantează siguranța utilizatorilor, dar se sporește performanța și se lungește durata de viață a bateriei, reducând costurile de mențenanță prin reducerea frecvenței de înlocuire ale acesteia.

## 2.3 Monitorizarea bateriei

Monitorizarea bateriei implică pe de o parte măsurarea unor parametrii fizici ai bateriei, iar pe de altă parte estimarea unor stări ale bateriei ce depind de anumiți factori precum mărimi fizice și condițiile de operare. Parametrii fizici ai bateriei ce pot fi măsuраți direct de către BMS sunt tensiunea, curentul, temperatura și presiunea. Presiunea nu va constitui un subiect de discuție în contextul acestei lucrări. Tensiunile se măsoară pentru fiecare celulă individuală sau pentru o grupare de celule, iar temperatura și curentul se măsoară pentru întreaga baterie.

Parametrii bateriilor sunt mărimi analogice, iar pentru prelucrarea numerică este nevoie de conversia acestora în domeniul digital. Acest proces este realizat de un circuit ADC (Analog to Digital Converter) și presupune maparea setului infinit de valori ale semnalului analogic la un set de valori finite, introducându-se astfel o mică eroare de cuantizare. Integratul MC33772C folosit în această lucrare furnizează valori digitale ale semnalelor analogice de interes.

Măsurarea parametrilor poate fi realizată folosind senzori dedicați sau folosind o metodă de măsură indirectă. Metoda de măsură indirectă presupune calculul mărimei dorite pe baza unei alte mărimi ce poate fi determinată mai ușor, cunoșcând relația dintre acestea. De cele mai multe ori se măsoară tensiunea cu ajutorul căreia se determină mărimea dorită, așa cum este detaliat în subcapitolele următoare.

### 2.3.1 Măsurarea curentului

Pornind de la legea lui Ohm, curentul poate fi determinat măsurând căderea de tensiune pe o sarcină rezistivă. În figura 2.3 se prezintă schema bloc a unui circuit de măsură al curentului folosind metoda indirectă.

Dezavantajul acestei metode constă în căderea de tensiune pe rezistorul de șunt, de aceea, pentru minimizarea acesteia se folosesc adesea sarcini cu valori mici de ordinul  $m\Omega$  sau chiar  $\mu\Omega$ . Așadar, tensiunile măsurate sunt mult mai mici comparativ cu referința de tensiune a ADC-ului, de aceea se introduce un amplificator de tensiune pentru a "lărgi" domeniul de valori.

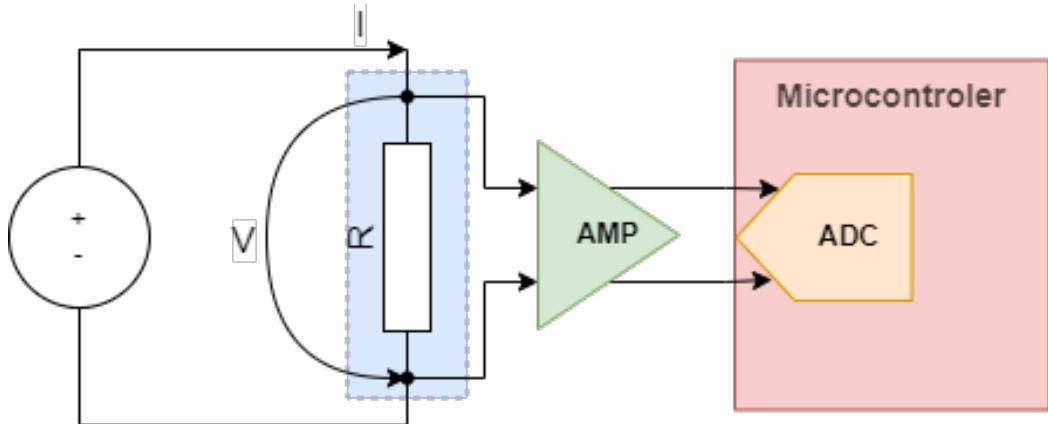


Figura 2.3: Măsurarea tipică a curentului

### 2.3.2 Măsurarea temperaturii

Determinarea temperaturii se poate realiza folosind un termistor a cărui rezistență este puțernic corelată cu temperatura. Cele două tipuri de termistori ce pot fi folosiți sunt termistorii NTC (Negative Temperature Coefficient), în cazul cărora valoarea rezistenței scade atunci când temperatura crește, și PTC (Positive Temperature Coefficient) pentru care valoarea rezistenței crește pe măsură ce temperatura crește.

Cea mai comună metodă de măsură este folosirea unei configurații de tip divizor rezistiv format dintr-un termistor și un rezistor de referință. În această lucrare este folosit un termistor NTC cu valoarea  $10\text{ k}\Omega$  la temperatura camerei și un rezistor de referință cu valoarea de  $6,8\text{k}\Omega$ . Acestea sunt amplasate pe placă de dezvoltare FRDM33772CSPEVB (capitolul 3.3).

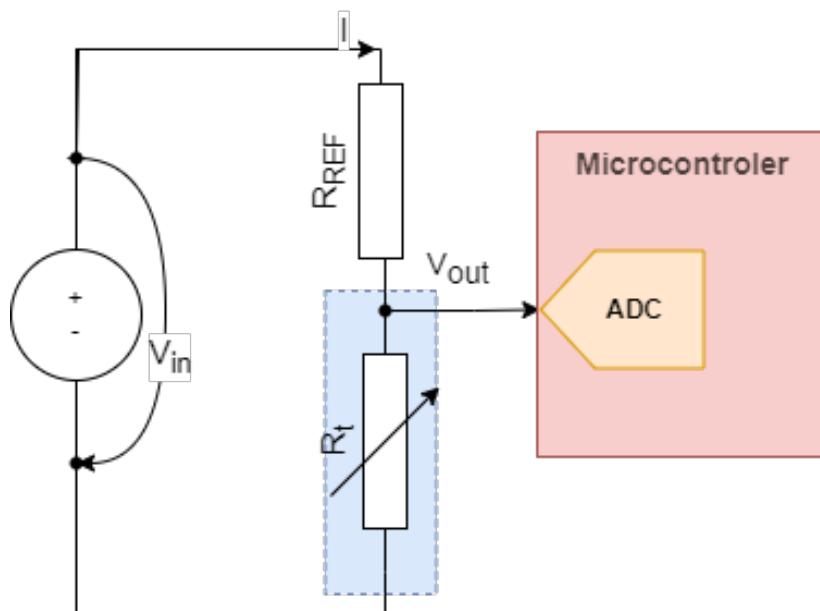


Figura 2.4: Măsurarea tipică a temperaturii

Se măsoară tensiunea  $V_{out}$  și se determină valoarea rezistenței termistorului pornind de la formula divizorului rezistiv, știind rezistența referinței  $R_{REF}$

$$V_{out} = V_{in} \frac{R_T}{R_T + R_{REF}}.$$

Formula poate fi prelucrată pentru a ajunge la forma

$$R_T = \frac{R_{REF}}{\frac{V_{in}}{V_{out}} - 1},$$

iar dacă referința de tensiune a ADC-ului este egală cu  $V_{in}$ , formula poate lua forma

$$R_T = \frac{R_{REF}}{\frac{2^N - 1}{N_{ADC}} - 1},$$

unde  $N$  reprezintă numărul de biți pe care poate fi reprezentată măsurătoarea ADC-ului, iar  $N_{ADC}$  reprezintă valoarea numerică a tensiunii  $V_{out}$ .

Ultimul pas reprezintă determinarea temperaturii pe baza rezistenței aflate anterior. Acest calcul se poate efectua prin mai multe metode, cea mai cunoscută fiind folosirea ecuației lui Steinhart-Hart

$$\frac{1}{T} = A + B \ln R_T + C(\ln R_T)^3,$$

unde  $T$  este temperatura în grade Kelvin, iar  $A$ ,  $B$ ,  $C$  sunt coeficienții Steinhart.

În această lucrare a fost folosită ecuația  $\beta$  bazată pe constanta de material  $\beta$  furnizată de către producătorul termistorului în foaia de catalog. Această ecuație reprezintă o aproximatie și prezintă deviații de aproximativ 2% față de ecuația Steinhart-Hart. Cu toate acestea, pentru valori ale temperaturii de peste  $40^\circ C$ , deviația scade sub 1%[8]. Acest lucru determină o măsurare mai exactă a temperaturii în jurul domeniului critic. Astfel, se reduce acuratețea pentru a reduce complexitatea calculelor, însă nu se compromite abilitatea BMS de a detecta instabilități termice ale bateriei.

Pentru determinarea temperaturii se pleacă de la formula constantei  $\beta$

$$\beta = \frac{\ln \frac{R_T}{R_{T0}}}{\frac{1}{T} - \frac{1}{T0}},$$

unde  $R_{T0}$  este valoarea rezistenței termistorului la temperatura  $T0$ . Formula poate fi adusă sub forma

$$\frac{1}{T} = \frac{1}{T0} + \frac{1}{\beta} \ln \frac{R_T}{R_{T0}}.$$

## 2.4 Protecția bateriei

Bateriile Li-Ion sunt foarte periculoase atunci când se află în afara limitelor de operare precizate de producător. Nerespectarea acestor limite poate fi catastrofală, consecințele fiind degradarea, supraîncălzirea, incendierea sau explozia bateriei.[9] Rolul principal al unui BMS este acela de a feri atât utilizatorul cât și bateria de pericolele unei defecțiuni.

Un BMS tipic este capabil de a proteja bateria împotriva încărcării celulelor peste limita de tensiune admisă, cât și descărcarea sub un anumit prag. Încărcarea sau descărcarea folosind un curent mai mare decât curentul maxim admis specificat de către fabricant reprezintă de asemenea un pericol ce trebuie împiedicat.

Pe lângă protecția de natură electrică, nu se recomandă folorirea bateriilor Li-Ion fără o protecție termică adecvată, acestea fiind susceptibile la incendii sau explozii.

### **2.4.1 Monitorizarea tensiunii**

BMS este responsabil pentru monitorizarea tensiunilor tuturor celulelor ce formează bateria. Valorile tensiunilor trebuie păstrate în interiorul unui interval ce permite operarea optimă descrisă de fabricant, fără a supraîncărca sau supradescărca nicio celulă. Limitele acestui interval pot fi prelucrate pentru a optimiza durata de viață a bateriei. Acestea sunt cunoscute sistemului de monitorizare, iar la detectarea proximității de limita superioară sau inferioară a unei tensiuni, BMS ia decizii pentru a împiedica depășirea acestor praguri.

În timpul încărcării, dacă se detectează apropierea unei celule de limita superioară a domeniului de tensiune, BMS poate solicita micșorarea graduală a curentului de încărcare sau poate deconecta complet bateria dacă limita a fost atinsă. Similar, dacă în timpul descărcării una sau mai multe celule se apropie de limita inferioară, BMS va decide decuplarea bateriei de sarcină.

### **2.4.2 Monitorizarea curentului**

Monitorizarea curentului ce intră sau ieșe din baterie este importantă pentru operarea în condiții optime și pentru durata de viață a bateriei. Nerespectarea limitelor impuse de fabricant asupra curentului maxim de încărcare sau descărcare poate provoca daune majore bateriei și, mai important, poate pune viață utilizatorilor în pericol. BMS monitorizează constant curentul folosind măsurători periodice, astfel încât să poată detecta rapid depășiri ale limitelor impuse și să poată lua o decizie. O decizie tipică în situația unui supracurent este decuplarea bateriei de sarcină.

Curenții de încărcare pot fi diferiți de curenții de descărcare, de aceea BMS trebuie să țină cont de sensul curentului și de pragul maxim permis modului de operare. De asemenea, un BMS performant trebuie să țină cont și de curenții de încărcare sau descărcare tranzitorii care pot depăși pragul maxim pentru un interval de timp cunoscut. Sistemul va monitoriza curentul, iar dacă acesta se încadrează în intervalul ce corespunde curentului de încărcare rapidă sau descărcare rapidă va incepe cronometrarea timpului. Dacă curentul este reglat astfel încât să se încadreze în limitele de operare normale, BMS va opri cronometrarea, decizia de decuplare fiind luată doar dacă timpul maxim furnizat de fabricant a fost depășit.

### **2.4.3 Monitorizarea și controlul temperaturii**

Controlul temperaturii este o sarcină esențială pentru a asigura siguranța, dar și performanța bateriei. Într-o baterie, celulele sunt suficiente de apropiate ca temperatura fiecărei celule să poată fi aproximată cu temperatura unui ansamblu de baterii, chiar dacă în realitate temperaturile celulelor nu sunt neapărat identice. Astfel se reduce numărul necesar de senzori de temperatură, reducând costurile și complexitatea sistemului. Ideal, întreaga baterie trebuie să aibă aceeași temperatură, de aceea, BMS poate implementa tehnici pentru a obține temperaturi cât mai apropiate.

BMS deține informații cu privire la limitele de temperatură în care trebuie să opereze bateria și poate decide activarea sistemelor de răcire în cazul temperaturilor ridicate, sau activarea unor surse de căldură în cazul temperaturilor scăzute. De exemplu, un BMS nu va permite încărcarea unei baterii la temperaturi sub  $0^{\circ}\text{C}$  pentru a evita degradarea sa. Similar, sistemul va opri descărcarea și va porni imediat sistemele de răcire în cazul unei temperaturi

ridicate, de exemplu peste  $45^{\circ}C$ .

Zona geografică în care va opera sistemul joacă un rol important în determinarea metodelor de gestionare termică. De exemplu, se va pune mai mult accent pe sistemele de răcire pentru un sistem ce va opera în Hawaii decât pentru unul ce va fi folosit în Alaska[10].

La prima vedere pare că bateriile Li-Ion pot opera într-o gamă generoasă de temperaturi, performanțele bateriei sunt însă afectate odată cu abaterea față de temperatura optimă specificată de fabricant. Așadar, în încercarea de a maximiza potențialul bateriei, BMS va monitoriza temperatura și va lua decizii pentru a ramâne în domeniul optim de operare.

## 2.5 Gestionarea capacitații

Analiza capacitații unei baterii este importantă pentru a ridica performanțele sistemului. Cunoscând capacitatea rămasă, BMS poate crea o strategie pentru a exploata la maxim bateria. Astfel, utilizatorul va beneficia de folosirea dispozitivului mai mult timp până când acesta va fi nevoie să reîncarce bateria.

Există multe metode de a gestiona capacitatea bateriei, iar toate aceste metode au la bază estimarea stării de încărcare, SoC (State of Charge). Pe lângă această mărime, se mai poate estima cât timp mai poate fi folosită bateria. Această estimată reprezintă stare de viață a bateriei, SoH (State of Health).

### 2.5.1 State of Charge

SoC este definit ca raportul dintre capacitatea (Ah) disponibilă la un moment de timp și capacitatea atunci când bateria este încărcată. Această mărime este exprimată ca un procent, unde 100% reprezintă faptul că bateria este complet încărcată, iar 0% reprezintă faptul că bateria nu mai poate elibera energie deoarece este complet descărcată.

$$SoC = \frac{C_{disponibil}}{C_{total}} \cdot 100\%$$

Capacitatea bateriei nu este fixă, aceasta depinzând de mulți factori, cum ar fi curenții de încărcare sau descărcare, temperatura, îmbătrânirea bateriei și posibile daune cauzate în timpul funcționării. Figura 2.5 prezintă o variație tipică a capacitații și tensiunii bateriilor Li-Ion în funcție de curent și temperatură.

SoC poate fi reprezentat ca un raport absolut, atunci când referința este capacitatea specificată de fabricant la momentul confectionării, sau relativă, atunci când referința este modificată corespunzător pentru a reflecta cât mai aproape de realitate capacitatea maximă a bateriei în timpul folosirii.[11].

Deoarece bateria se va deteriora gradual în timpul folosirii, aceasta nu va mai putea atinge capacitatea maximă, chiar dacă procesul de încărcare este finalizat. De aceea, folosirea estimării SoC folosind raportul absolut va produce în timp valori mai mici decât 100% chiar dacă bateria este complet încărcată. Acest lucru poate induce în eroare utilizatorii. Raportul relativ permite menținerea estimatei SoC între 0% și 100% deoarece capacitatea de referință este ajustată, putându-se atinge valoarea maximă a domeniului chiar dacă capacitatea bateriei

a scăzut în realitate.

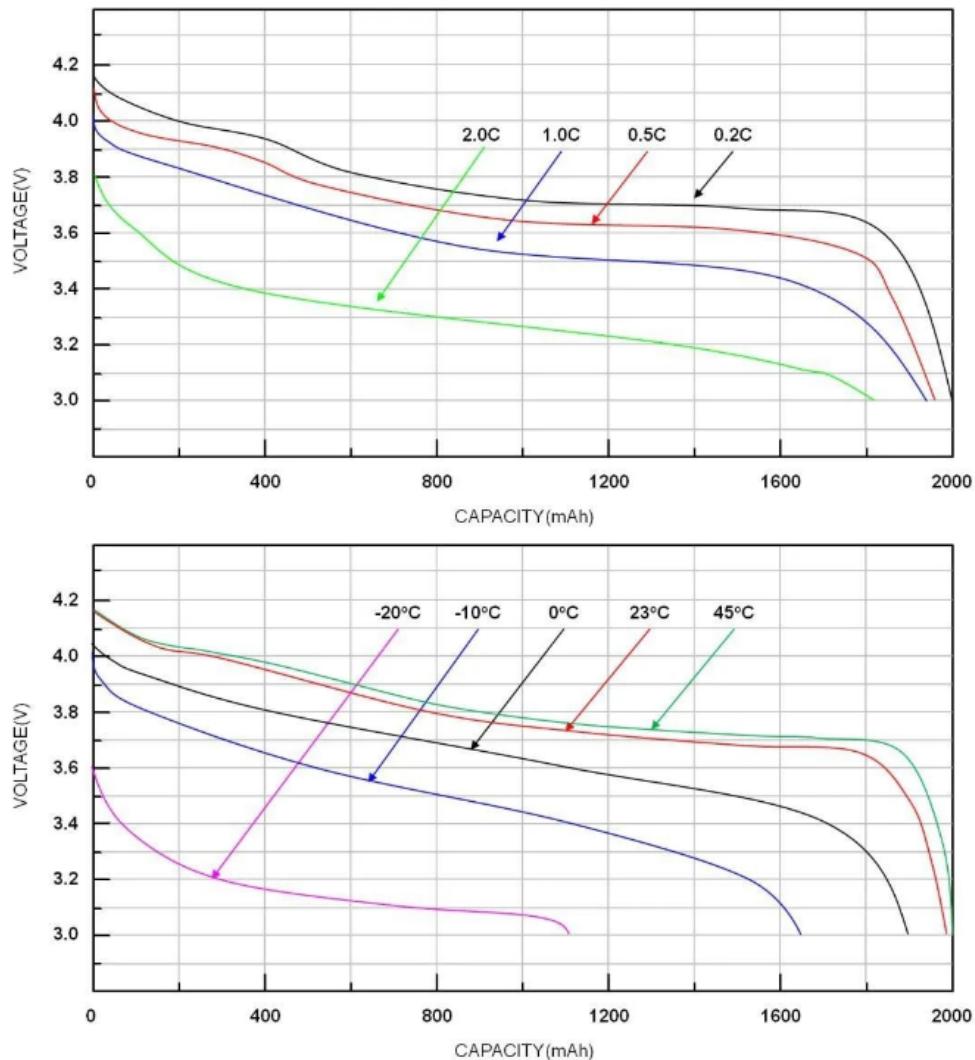


Figura 2.5: Variația tipică a capacității și tensiunii în funcție de curent și temperatură  
Sursa:<https://www.linkedin.com/pulse/design-lithium-ion-battery-charging-discharging-theory-bruce-feng>

## Principiul măsurării SoC

Determinarea estimatei SoC reprezintă o sarcină complexă ce depinde de tipul bateriei și sistemul în care este integrată aceasta. Cu toate acestea, BMS este responsabil de a realiza o estimată cu o acuratețe cât mai mare. Cu cât acuratețea este mai ridicată, cu atât sistemul va fi mai performant, putând fi luate decizii adecvate stării reale a bateriei.[12]

O abordare comună pentru determinarea SoC este măsurarea precisă atât a tensiunilor și currentului, cât și a sarcinilor electrice furnizate sau primite de baterie. Pentru creșterea acurateții, algoritmul folosit poate lua în considerare și temperatura sau alte date, de obicei furnizate de fabricant, cu privire la anumite condiții de operare și influența acestora asupra stării bateriei.

În esență, BMS va determina starea de încărcare inițială a bateriei, monitorizând pe urmă sarcina electrică ce părăsește bateria sau este primită de aceasta.

Cele mai comune metode folosite pentru estimarea SoC, dar și a SoH, indiferent de tipul bateriei, sunt metoda tensiunilor care folosește curba de variație a tensiunii în circuit deschis și a stării de încărcare, metoda numărării coulombilor (Coulomb Counting) și folosirea filtrului Kalman.

## Metoda curbei de variație OCV - SoC

Această metoda este cea mai simplă din punct de vedere al complexității. Determinarea estimatei SoC folosind metoda tensiunilor constă în măsurarea tensiunilor și folosirea diagramelor furnizate de fabricant ce descriu cum variază SoC în funcție de tensiunea celulelor când nu este aplicată nicio sarcină electrică la bornele sale (OCV - Open Circuit Voltage). Valorile de interes extrase din aceste curbe pot fi stocate într-o memorie nevolatilă pentru a putea fi accesate cu ușurință de unitatea centrală de procesare a BMS, de regulă un microcontroler.

Complexitatea redusă vine cu dezavantajul unei acurateți scăzute, deoarece tensiunile bateriilor sunt dependente și de alți factori, cum ar fi curentul sau temperatura. Se poate încerca creșterea acurateței corectând valorile măsurate cu ajutorul altor curbe de variație, de exemplu variația tensiunii în funcție de temperatură, însă această corecție este costisitoare din punct de vedere al timpului de execuție.[12].

## Coloumb Counting

CC (Coulomb Counting) este metoda cea mai populară folosită pentru estimarea stării de încărcare. Aceasta mai este cunoscută și sub numele de metoda integrării curentului, deoarece se bazează pe măsurarea curentului apoi integrarea acestor măsurători pe un interval de timp. Formula generală ce descrie metoda CC este:

$$SoC = SoC(t_0) + \frac{1}{C} \int_t^{t+\tau} I(t) dt,$$

unde  $SoC(t_0)$  reprezintă starea de încărcare a bateriei la momentul initial, C reprezintă capacitatea maximă a bateriei, iar  $I(t)$  este curentul furnizat sau primit de baterie. Valoarea curentului este fie pozitivă, dacă bateria este încărcată, fie negativă, dacă bateria este descărcată.

Pierderile acumulate fie prin procesul de măsură, fie prin fenomenul de auto-descărcare, au fost neglijate pentru simplitate. Pentru o acuratețe a estimării cât mai mare, aplicațiile complexe ar putea lua în considerare și aceste pierderi în algoritmii folosiți. Astfel, formula de mai sus devine:

$$SoC = SoC(t_0) + \frac{1}{C} \int_t^{t+\tau} I(t) - I_{pierderi}(t) dt,$$

unde  $I_{pierderi}(t)$  înglobează toate pierderile ce produc erori.

Erorile sunt inevitabile, însă acestea pot fi corectate în oricare dintre cele trei stadii ale ciclului de viață al bateriei: sfârșitul încărcării ( $SoC = 100\%$ ), sfârșitul descărcării ( $SoC = 0\%$ ) sau în momentul de repaus în care bateria nu este nici încărcată, nici descărcată.

## 2.5.2 State of Health

O baterie va începe gradual să își piardă din abilitatea de a stoca și furniza energie. Acest fenomen este influențat de criterii precum temperatura, numărul de cicli de încărcare sau descărcare, și îmbătrânirea cauzată de folosirea pe durete îndelungată. Astfel o baterie folosită nu va mai avea capacitatea unei baterii noi.

Starea de sănătate a bateriei (State of Health) reprezintă estimata determinată de BMS ce descrie potențialul curent al bateriei de a stoca sau furniza energie raportat la cel al unei baterii noi. Formula generală a estimatei SoH este:

$$SoH = \frac{C_{max}}{C_{nominal}} 100\% [12],$$

unde  $C_{max}$  reprezintă capacitatea maximă a bateriei la momentul actual, iar  $C_{nominal}$  reprezintă capacitatea bateriei garantată de fabricant la confectionare.

Această estimată, asemenea estimatei SoC, este exprimată ca un procentaj, 100% reprezentând o baterie nouă. Un SoH scăzut semnalizează utilizatorului că durata de viață a bateriei a scăzut și că aceasta ar trebui înlocuită.

## 2.5.3 Echilibrarea celulelor

O baterie poate fi formată dintr-una sau mai multe celule de același tip. Celulele nu sunt identice, chiar dacă acestea sunt de același tip, existând diferențe la valoarea rezistenței interne, rata de încărcare, descărcare sau rata de auto-descărcare. Aceste diferențe pot fi mici, dar în timp pot rezulta într-o baterie inutilizabilă dacă BMS nu realizează o gestionare corespunzătoare.

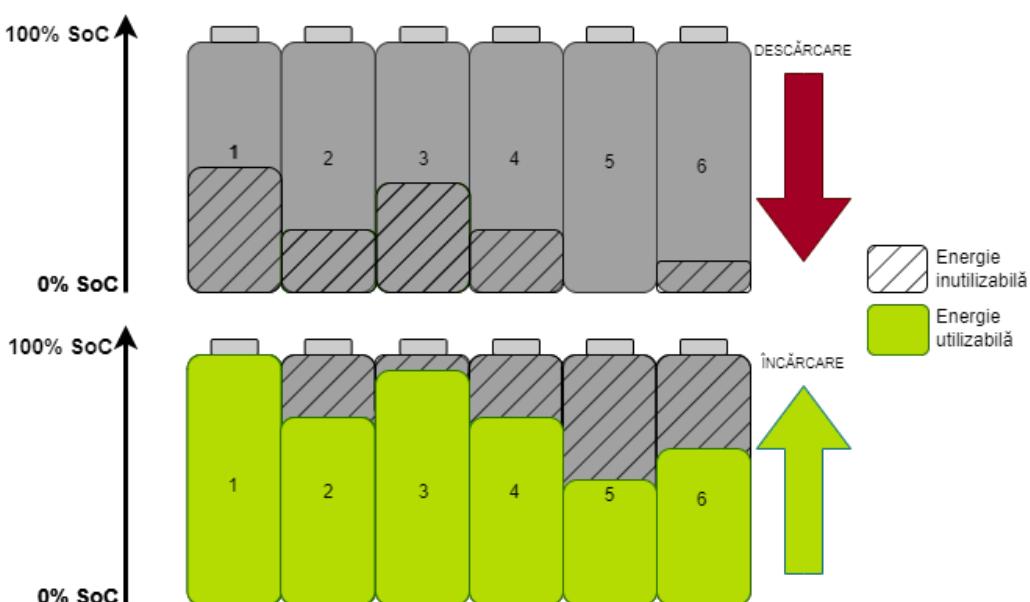


Figura 2.6: Comportamentul celulelor neechilibrate în timpul încărcării și descărcării

În timpul ciclilor de încărcare/descărcare, celulele se vor încărca sau descărca diferit din cauza diferențelor de capacitate, însă BMS nu va permite depășirea pragurilor impuse de fabricant

pentru niciuna dintre celule, astfel că bateria nu va putea fi complet încărcată sau descărcată, energia fiind irosită.

Figura 2.6 descrie comportamentul celulelor asupra cărora nu s-au aplicat tehnici de echilibrare. În timpul procesului de descărcare, celula cu numărul 5 este prima care se descarcă. Astfel, procesul de descărcare este oprit de către BMS pentru a nu deteriora celula, însă restul celulelor nu au eliberat întreaga energie. Similar, în timpul procesului de încărcare, celula cu numărul 1 este prima care ajunge să fie încărcată complet, iar BMS oprește procesul de încărcare pentru a nu supraîncărca celula. Acest neechilibru va deveni tot mai mare odată cu folosirea bateriei, reducând drastic energia disponibilă a bateriei. Soluția constă în echilibrarea celulelor.

Echilibrarea celulelor se referă la egalizarea cu erori cât mici a SoC pentru fiecare celulă. În general, în timpul încărcării, se descarcă celulele mai încărcate pentru a oferi timp restul celulelor să ajungă la același nivel. Acest proces este realizat prin două metode, echilibrarea pasivă și echilibrarea activă.

## Echilibrarea pasivă

Echilibrarea pasivă presupune folosirea unei sarcini rezistive cu ajutorul căreia surplusul de energie să fie disipat prin această sarcină.

Deoarece celulele slabe ating limita superioară a domeniului de tensiune mai rapid decât restul celulelor, BMS oprește încărcarea și pornește procesul de echilibrare pentru celulele respective. Energia este disipată prin sarcina rezistivă până când toate celulele au tensiuni comparabile. Încărcarea este repornită, iar procesul este repetat până când toate celulele sunt complet încărcate.

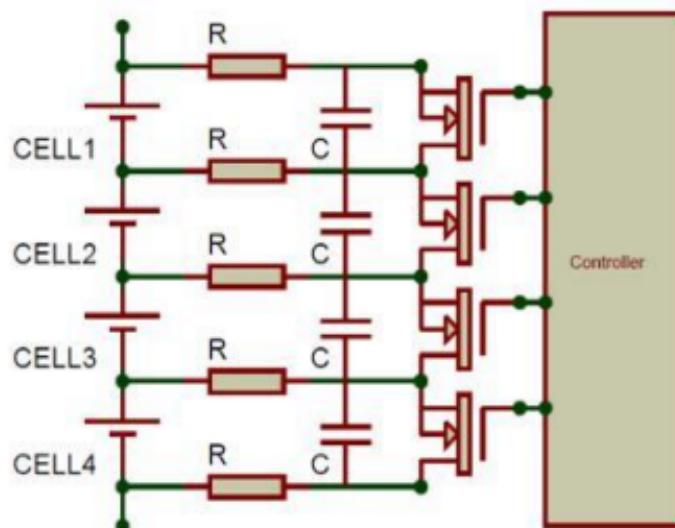


Figura 2.7: Echilibrarea pasivă a celulelor  
Sursa:<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1716/1/012005/meta>

În figura 2.7 este prezentat ansamblul hardware al canalelor de echilibrare. Fiecare celulă

dispune de propriul canal de echilibrare, care constă într-un tranzistor MOSFET care este activat de către microcontroler. La activare, celula va fi cuplată la o sarcină rezistivă prin care se va scurge un curent, descărcând astfel celula.

În această lucrare se folosește metoda de echilibrare pasivă folosind cele 6 canale de echilibrare ale integratului MC33772C.

## Echilibrarea activă

Echilibrarea activă realizează transferul de energie între celule atunci când există discrepanțe. Avantajul acestei metode constă în lipsa pierderilor prin procesul de disipare a energiei. Cu toate acestea, această metodă este mai puțin comercializată din cauza complexității ridicate[13].

Transferul energiei este realizat printr-un proces inductiv, folosind transformatoare, sau capacitive, folosind condensatoare. Topologii tipice pentru realizarea balansării active folosind ambele metode sunt prezentate în figura 2.8.

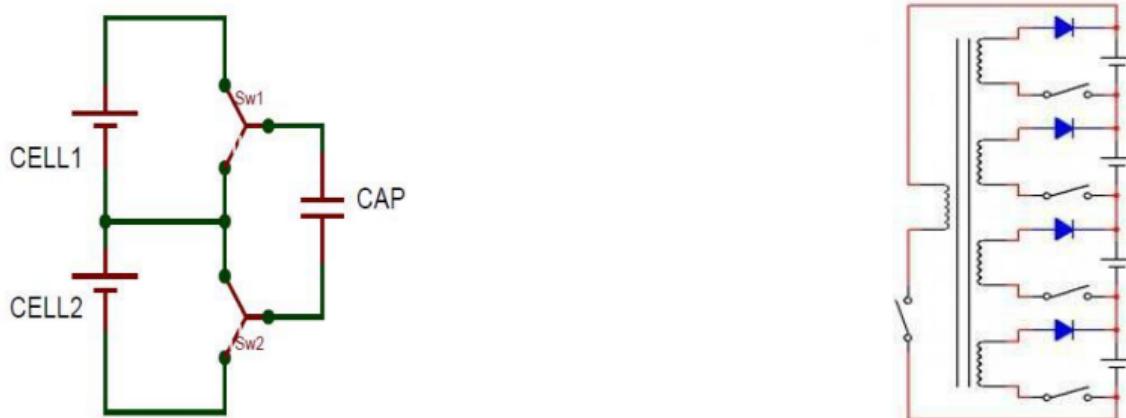


Figura 2.8: Echilibrarea activă a celulelor

Sursa:<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1716/1/012005/meta>

Tranzistorii din configurația capacitive au rol de comutatoare care sunt activate atunci când există celule ce au valoarea tensiunii mai mare decât restul tensiunilor.

Pentru configurația inductive, similar, fiecărei celule îi este alocată un comutator ce este activat atunci când BMS decide pornirea procesului de echilibrare pentru respectiva celulă. Deoarece transformatoarele nu funcționează pentru circuite de curent continuu, este adăugat un comutator suplimentar pentru realizarea unor pulsuri cu o anumită frecvență.



## Capitolul 3

### Resurse hardware

#### 3.1 Microcontrolerul S32K344

Microcontrolerul (MCU) S32K344 este inima BMS, întrucât acesta este unitatea centrală de procesare responsabilă pentru controlul integratului MC33772C, analiza defectiunilor și prelucrarea măsurătorilor, executarea algoritmilor pentru estimarea SoC și SoH, controlul releelor pentru decuplarea bateriei în cazul defectiunilor și comunicarea cu modulele externe.

S32K344 este un microcontroler de uz general care face parte din familia S32K3 dezvoltată de compania NXP Semiconductors în special pentru aplicații automotive unde mediile de operare sunt dure din punct de vedere electric. Are la bază procesorul Arm Cortex-M7 pe 32 de biți ce poate funcționa cu frecvențe de până la 160 MHz. Pentru asigurarea standarelor de siguranță, microcontrolerul dispune de două core-uri de procesor ce operează în lockstep.

Cu o memorie de program de 4MB, memorie RAM de 512KB, S32K344 poate suporta aplicații complexe, fiind ideal pentru dezvoltarea unui BMS performant.

Din varietatea de periferice ale acestui microcontroler, cele de interes pentru sistemul dezvoltat în această lucrare sunt: LPSPI (Low Power Serial Peripheral Interface), STM (System Timer Module), LPUART (Low Power Universal Asynchronous Receiver/Transmitter), FlexCAN (Controller Area Network) și SIUL2 (System Integration Unit Lite2).

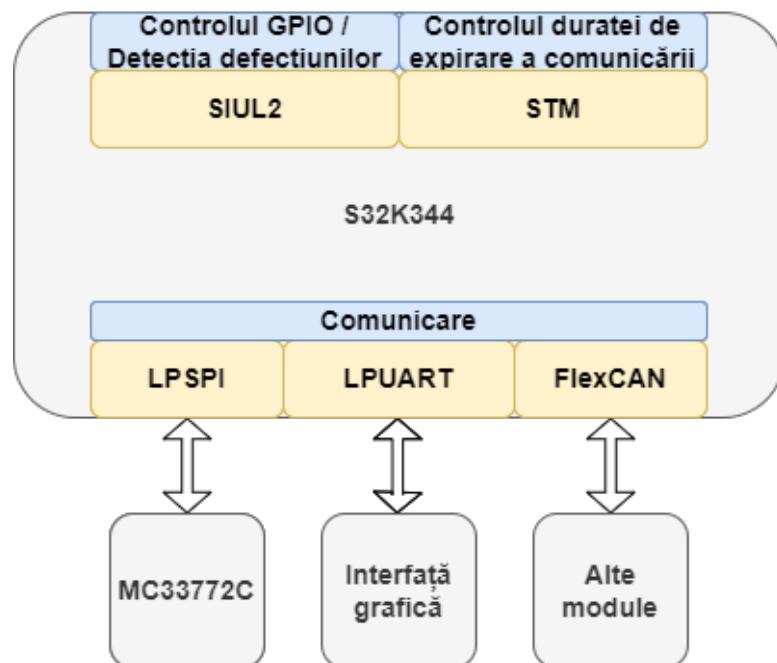


Figura 3.1: Perifericele folosite și rolul acestora

### 3.1.1 Placa de dezvoltare S32K3X4EVB-Q257



Figura 3.2: Placa de dezvoltare S32K3X4EVB-Q257

Placa de dezvoltare folosită pentru realizarea părții practice a lucrării a fost gândită pentru a permite dezvoltatorilor software testarea fiecărei funcții ale microcontrolerului S32K344. Această placă oferă o interfață de depanare folosind microcontrolerul K26\_180 dezvoltat de NXP Semiconductors. Astfel este ușurată dezvoltarea software-ului, urcarea codului și depanarea acestuia realizându-se cu ajutorul portului USB existent pe placă.

Placa este alimentată de la o sursă de tensiune continuă de 12V. Aceasta este echipată cu butoane, potențiometre, LED-uri RGB, transcievere CAN și LIN, suport audio, interfață MII/RII Ethernet și alte componente ce facilitează utilizarea microcontrolerului la potențialul său maxim.

## 3.2 Emulatorul de baterii BAT6-EMULATOR

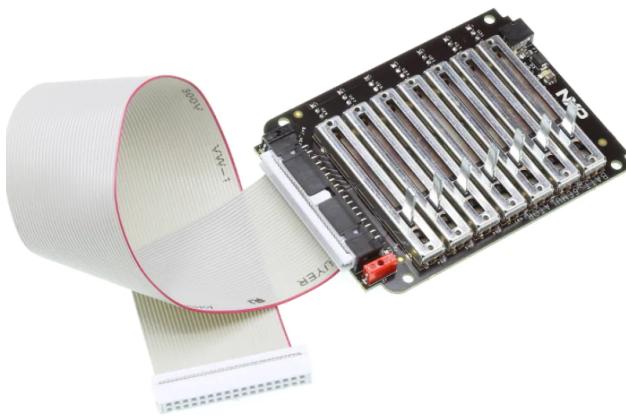


Figura 3.3: Emulatorul de baterii cu 6 celule, BATT6-EMULATOR

În timpul procesului de dezvoltare software este nevoie de o testare continuă și riguroasă pentru asigurarea funcționării BMS. Dezvoltarea și testarea folosind baterii reale ar fi costisitoare din punct de vedere al timpului, dar și periculoase din cauza sensibilităților bateriilor

Li-Ion. Soluția propusă de NXP Semiconductors este folosirea unor emulatoare de baterii care dețin surse de tensiune controlabile cu ajutorul unor potențiometre.

Emulatorul BATT6-EMULATOR poate fi folosit cu ușurință împreună cu placile de dezvoltare FRDM33772CSPEVB (MC33772C cu interfața SPI) și KIT33772CTPLEVB (MC33772C cu interfața TPL și transformatoare încorporate pentru aplicații de tensiuni înalte).

BATT6-EMULATOR este alimentat de la o sursă de tensiune continuă de 12V. Aceasta facilitează controlul a 7 tensiuni reglabile cu ajutorul potențiometrelor, 6 dintre acestea pot fi controlate în intervalul 1,25V - 4,8V, iar ultima tensiune în intervalul -150mV - 150mV, ideal pentru a simula căderea de tensiune pe un rezistor de șunt, obținând astfel comportamentul curentului de test.

Până la 3 astfel de emulatoare pot fi inseriate pentru obținerea unor tensiuni mai ridicate. 3 emulatoare produc împreună o tensiune maximă de până la 86,6V. În lucrarea de față se va folosi un singur emulator pentru a simula o baterie de 24V.

### 3.3 Integratul MC33772C

MC33772C este un controler pentru celulele bateriilor Li-Ion (BCC) conceput pentru aplicații automotive și industriale precum autovehicule hibride, autovehicule electrice, surse de alimentare neîntreruptă, dar și drone, scutere sau trotinete electrice.

Integratul dispune de 6 canale de măsură a tensiunilor, 7 pini ce pot fi configurați ca GPIO-uri sau pini de intrare pentru ADC, de exemplu pentru măsurarea temperaturii, și un senzor de curent cu un amplificator programabil integrat. Permite implementarea funcționalităților de siguranță specifice BMS prin configurarea limitelor pentru tensiune, curent și temperatură și detecția depășirilor acestor limite.

Echilibrarea este posibilă pentru fiecare celulă folosind cele 6 canale de echilibrare pasivă. Aceste canale operează cu ajutorul tranzistorilor MOSFET interni cu rezistență drenă-sursă ce permite scurgerea unui curent de 300mA.

Integratul poate comunica direct cu microcontrolerul prin intermediul interfeței SPI cu viteze de până la maxim 4 Mbps, sau indirect cu ajutorul unui alt integrat (MC33664 sau MC33665A). Integratele MC33664 și MC33665A comunică cu microcontrolerul prin SPI sau CAN, iar cu MC33772C prin intermediul unui semnal sinusoidal diferențial descris de protocoul TPL pentru realizarea izolării galvanice.

În această lucrare se va pune accent pe comunicația directă cu microcontrolerul prin SPI, scopul fiind dezvoltarea unei aplicații pentru sisteme ce folosesc tensiuni joase unde izolarea galvanică nu este necesară.

## Placa de dezvoltare FRDM33772CSPEVB

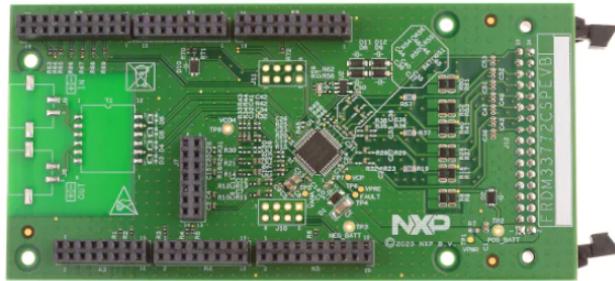


Figura 3.4: Placa de dezvoltare FRDM33772CSPEVB

Această placă a fost concepută pentru evaluarea integratului MC33772C. Este ușor utilizabilă cu emulatorul BATT6-EMULATOR și cu orice placă de dezvoltare bazată pe microcontrolerele din familia S32K3, FRDM33772CSPEVB fiind doar însăptă în conectorii mamă existenți. Integratul este alimentat prin emulator, FRDM33772CSPEVB fiind conectată prin un conector panglică la BATT6-EMULATOR.

Hardware-ul include rezistorii pentru echilibrarea celulelor, filtre RC pentru măsurători, pini de uz general, sau cu funcții specifice, care sunt mapăti convenabil la pinii plăcii de dezvoltare S32K3X4EVB-Q257, EEPROM și LED ce indică starea actuală a integratului.

### 3.3.1 Sistemul complet

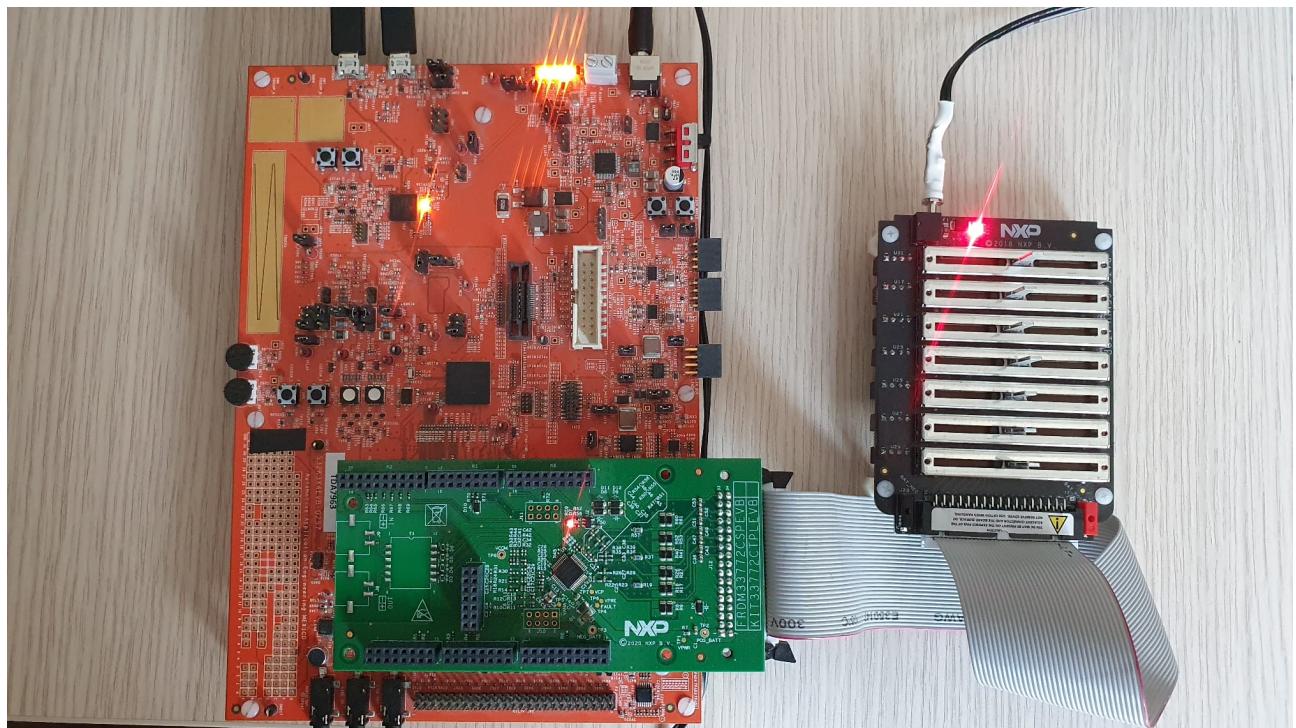


Figura 3.5: Sistemul hardware interconectat

# Capitolul 4

## Resurse software

### 4.1 Mediul de dezvoltare S32 Design Studio

S32 Design Studio (S32DS) este un mediu de dezvoltare oferit de compania NXP Semiconductors pentru produsele din gama S32, precum S32G, S32K1, S32K3, S32R41.

Este un instrument gratuit bazat pe tehnologii open-source cum ar fi Eclipse IDE, GNU Compiler Collection (GCC) și GNU Debugger (GDB). Permite navigarea prin fișierele proiectului, editarea, importarea și configurarea pachetelor software, compilarea și depanarea programelor fără a limita demensiunea codului sursă.

S32DS oferă o interfață grafică ușor de utilizat pentru configurarea software-ului. În lucrarea de față au integrate pachetul software RTD (Real Time Drivers) pentru familia de microcontrolere S32K3 versiunea 2.0.0, kitul de dezvoltare BMS versiunea 1.0.0 și pachetul FreeRTOS pentru familia S32K3 versiunea 2.0.0.

### 4.2 Pachetul software Real Time Drivers

RTD este un pachet de drivere ce facilitează controlul microcontrolerelor dezvoltate de NXP Semiconductors. Deoarece compania este foarte activă în domeniul automotive, driverele urmează standardul AUTOSAR (AUTomotive Open System ARchitecture), dar pot fi folosite și pentru aplicații ce nu aparțin de domeniul automotive. RTD 2.0.0 folosește standardul AUTOSAR Classic Release 4.4

În lucrarea de față vor fi folosite următoarele drivere ce fac parte din suita RTD:

- MCU (Microcontroller Unit) permite inițializarea de bază a microcontrolerului, oferind control asupra ceasurilor și distribuția acestora către restul perifericelor, și funcții de adormire sau resetare a microcontrolerului.
- PORT oferă control asupra tuturilor porturilor microcontrolerui, oferind utilizatorului posibilitatea de a atribui anumite funcții pinilor folosiți.
- DIO (Digital Input Output) permite controlul nivelului logic pentru pinii a căror funcție a fost configurață ca GPIO.
- PLATFORM se ocupă de activarea și configurarea întreruperilor.
- GPT (General Purpose Timers) permite folosirea numărătoarelor digitale ale microcontrolerului și definirea comportamentului în timpul întreruperii.
- ICU (Input Capture Unit) permite detecția întreruperilor externe pe diferiți pini.
- UART, SPI și CAN permit comunicarea folosind protocoalele aferente.

## 4.3 Pachetul software Battery Management System

Versiunea 1.0.0 a pachetului software BMS SDK (Software Development Kit) este un pachet de drivere ce a fost lansat în luna aprilie a anului 2023. Acesta oferă suportul software necesar pentru a utiliza soluțiile hardware dezvoltate de NXP Semiconductors.

BMS SDK conține driverele pentru controlul software atât al dispozitivelor ce controlează și monitorizează celulele bateriilor cât și a celor ce comunică cu acestea prin protocolul TPL (capitolul 4.3.1). Dispozitivele suportate de acest pachet sunt MC33772C (BCC cu 6 canale), MC33775A (BCC cu 14 canale), MC33774A (BCC cu 18 canale), MC33664 (tranceiver TPL cu un port) și MC33665A (tranceiver TPL cu 4 porturi). Aceste dispozitive pot fi folosite împreună într-o gamă largă de configurații, acoperind toate nevoile unui sistem BMS.

Software-ul de control al dispozitivelor BCC se ocupă doar de împachetarea mesajelor de control într-o structură de date numită Transaction Descriptor (TD). Transmisia acestor mesaje este realizată de transcieverele TPL cu ajutorul driverelor aferente în cazul aplicațiilor ce lucrează cu tensiuni înalte, sau prin intermediul interfeței SPI folosind protocolul TPL.

Driverul Bms\_SpiIf (capitolul 5.1) este echivalentul software al unui tranceiver TPL, rolul acestuia fiind transmisia mesajelor către dispozitivele BCC prin interfața SPI. Acest driver este o contribuție proprie și este inclus în pachetul software BMS SDK începând cu versiunea 1.0.0.

### 4.3.1 Protocolul Transport Physical Layer

TPL este un protocol dezvoltat de NXP Semiconductors pentru soluțiile BMS prezentate. Acest protocol descrie atât transmisia fizică, prin semnalelor sinusoidale diferențiale, dar și a formătului mesajelor prin care comunică toate dispozitivele BMS.

În continuare ne vom referi prin TPL doar la formatul cadrelor, transmisia fizică realizându-se prin SPI în cazul aplicației LVBMS. Există două versiuni TPL: TPL2 și TPL3. Dispozitivele BCC pot înțelege un singur format, MC33772C fiind bazat pe TPL2, iar restul pe TPL3. TPL2 este un cadru cu lungimea fixă de 48 de biți, în timp ce lungimea cadrului TPL3 poate fi variabilă între 64 și 128 de biți pentru transmisia unui număr mai mare de date simultan (până la 4 blocuri de date).

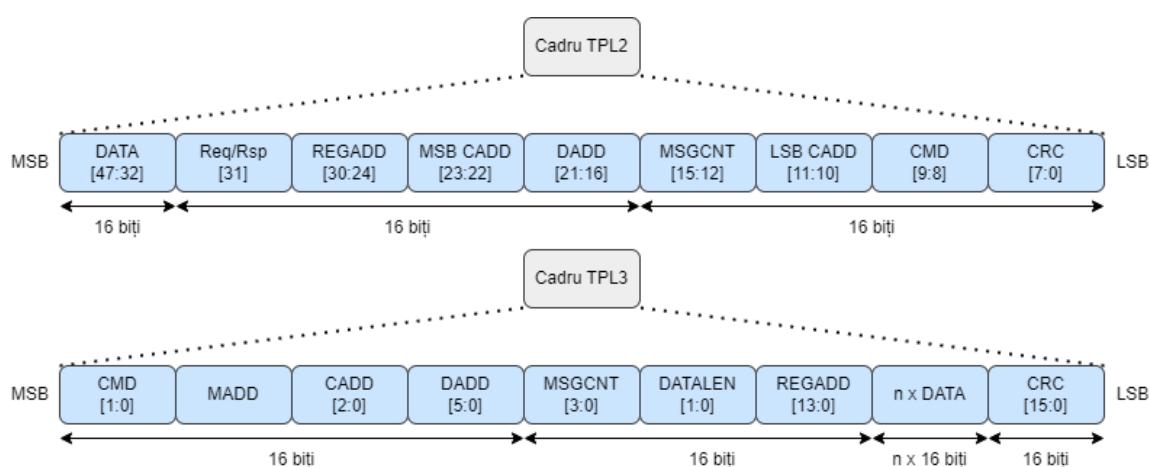


Figura 4.1: Formatul Transport Protocol Layer

Câmpurile cele mai importante sunt:

- DATA - un bloc cu lungimea de 16 biți ce conține datele trimise sau primite de dispozitiv.
- REGADD - reprezintă adresa registrului către care se dorește scrierea sau de la care se dorește citirea.
- CADD - Chain Address, reprezintă adresa lanțului de dispozitive. Acest câmp are lungimea de 3 biți, aşadar valorile pot fi din domeniul 0:7. Acest câmp ajută în special în aplicațiile de tensiuni înalte, unde pot exista multe dispozitive înlăncuite și multe lanțuri de dispozitive.
- DADD - reprezintă adresa dispozitivului ce poate lua valori în domeniul 0:63, însă unele adrese sunt rezervate.
- MSGCNT - este un câmp actualizat doar de dispozitiv și reprezintă numărul de mesaje transmise de către acesta. Acest câmp poate fi folosit pentru detectarea mesajelor pierdute.
- CMD - este un câmp cu lungimea de 2 biți ce descrie rolul cadrului. Comenzile ce descriu rolul mesajului pot fi de scriere, citire, NOP (No OPeration) și răspuns.
- CRC - Cyclic Redundancy Check este folosit pentru detectia erorilor ce pot apărea pe linia de transmisiune.

#### 4.3.2 Descriptorii de tranzacție - Transaction Descriptors

Descriptorii de tranzacție sunt structuri de date ce stau la baza arhitecturii software a pașchetului BMS. Aceștia sunt folosiți pentru schimbul de informație dintre MCU și dispozitivele BCC.

De regulă, adresa acestor descriptori este pasată funcțiilor implementate în driverele dispozitivelor BCC, iar acestea împachetează în interiorul TD-urilor mesajele care trebuie să ajungă la dispozitive, dar și anumite informații folosite de driverele de transmisie, inclusiv Bms\_SpiIf.

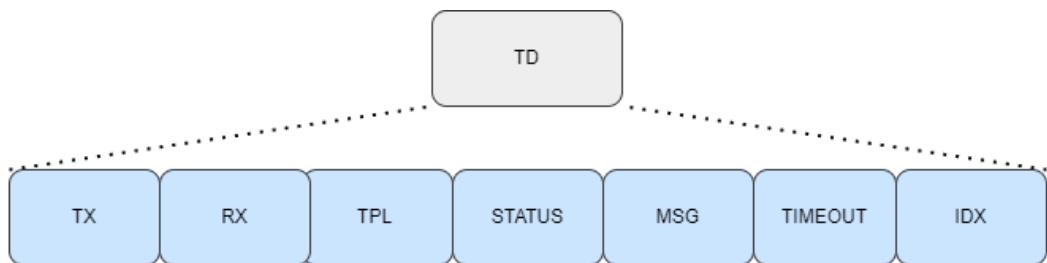


Figura 4.2: Construcția unui descriptor de tranzacție

Cele mai importante câmpuri prezentate în imaginea de mai sus reprezintă:

- TX - Buffer-ul ce conține toate mesajele care trebuie transmise dispozitivelor BCC sau trancieverelor TPL.
- RX - Buffer-ul ce conține toate mesajele care trebuie recepționate de la dispozitivele BCC sau trancieverele TPL.

- TPL - Protocolul TPL atribuit TD-ului (TPL2 sau TPL3). Un TD poate conține un singur tip de mesaje la un moment dat.
- STATUS - Statusul TD-ului. Acesta poate fi PENDING, dacă mesajele sunt în curs de transmisie, FINISHED dacă toate mesajele au fost transmise și recepționate corect, FAILED, dacă transmisia a eşuat, sau TIMEOUT, dacă timpul alocat transmisiei a expirat.
- MSG - Numărul mesajelor recepționate.
- TIMEOUT - Timpul de expirare al transmisiei. Dacă transmisia nu s-a efectuat în timpul alocat, TD-ul va fi declarat expirat.

### 4.3.3 FreeRTOS

Sistemul de operare este un program ce permite execuția mai multor sarcini în paralel. Deoarece un procesor nu poate executa simultan mai mult decât un singur fir de execuție la un moment de timp, sistemul de operare realizează execuția paralelă doar aparent, permitând o singură sarcină să fie executată la un moment dat, dar numai pentru un interval de timp, urmând apoi execuția unei alte sarcini.

Sistemele de operare de uz general precum Windows, macOS sau Linux sunt concepute pentru gestionarea unui set larg de aplicații, lucrul cu fișiere și interfațarea cu utilizatorul. Acestea nu sunt concepute pentru aplicații embedded, sistemele de operare în timp real fiind alegerea potrivită pentru acestea.

Un RTOS (Real Time Operating System) are aceeași funcție de bază, aceea de a facilita execuția sarcinilor multiple, dar nu este la fel de complex ca un sistem de operare de uz general. Pe lângă sincronizarea sarcinilor, acestea sunt responsabile de a decide ce sarcină ar trebui executată și cât timp.

FreeRTOS este un sistem de operare în timp real, open source, care nu necesită multe resurse, fiind ideal pentru aplicații embedded unde resursele sunt limitate. Acesta folosește un programator software pentru controlul execuției într-o manieră de transare a timpului. Sarcinile definite în aplicația LVBMS sunt executate cu ajutorul acestui programator pe rând timp de 1ms. Cu toate acestea, FreeRTOS permite atribuirea de priorități pentru a fi posibilă întreruperea unei sarcini în favoarea execuției uneia critice.[14]

### 4.3.4 FreeMASTER

FreeMASTER este o aplicație desktop dezvoltată de NXP Semiconductors care permite diagnoza și controlul sistemelor integrate. Oferă posibilitatea dezvoltării unei interfețe grafice prietenoase ce poate pune la dispoziție informații furnizate de sistem prin intermediul protocolului serial UART, dar și controla sistemului prin același protocol de comunicație.

FreeMASTER pune la dispoziție un driver prin intermediul căruia se poate accesa de la distanță anumite zone de memorie. Acest lucru se realizează prin intermediul unui tabel numit TSA (Target-Side Addressing) descris în sistemul dezvoltat. Acest tabel conține adresele variabilelor ce pot fi configurate doar pentru scriere, doar pentru citire, sau pentru ambele variante. Un astfel de tabel este folosit în aplicația prezentată în această lucrare, iar în tabel sunt specificate măsurători, variabile de stare și variabile de control.

## Capitolul 5

### Detalii de implementare

#### 5.1 Driverul Bms\_SpiIf

Bms\_SpiIf este o componentă software a pachetului BMS ce are rolul de a transmite mesajele împachetate în TD către dispozitivele BCC. Pentru a îndeplini această sarcină, driverul trebuie să decodeze și să valideze fiecare mesaj din interiorul descriptorului primit, notificând orice eroare de pe parcurs.

Un singur descriptor poate fi procesat la un moment dat, de aceea driverul va reiecta orice descriptor primit prin intermediul funcției Bms\_SpiIf.IO\_SendMessage în timpul procesării.

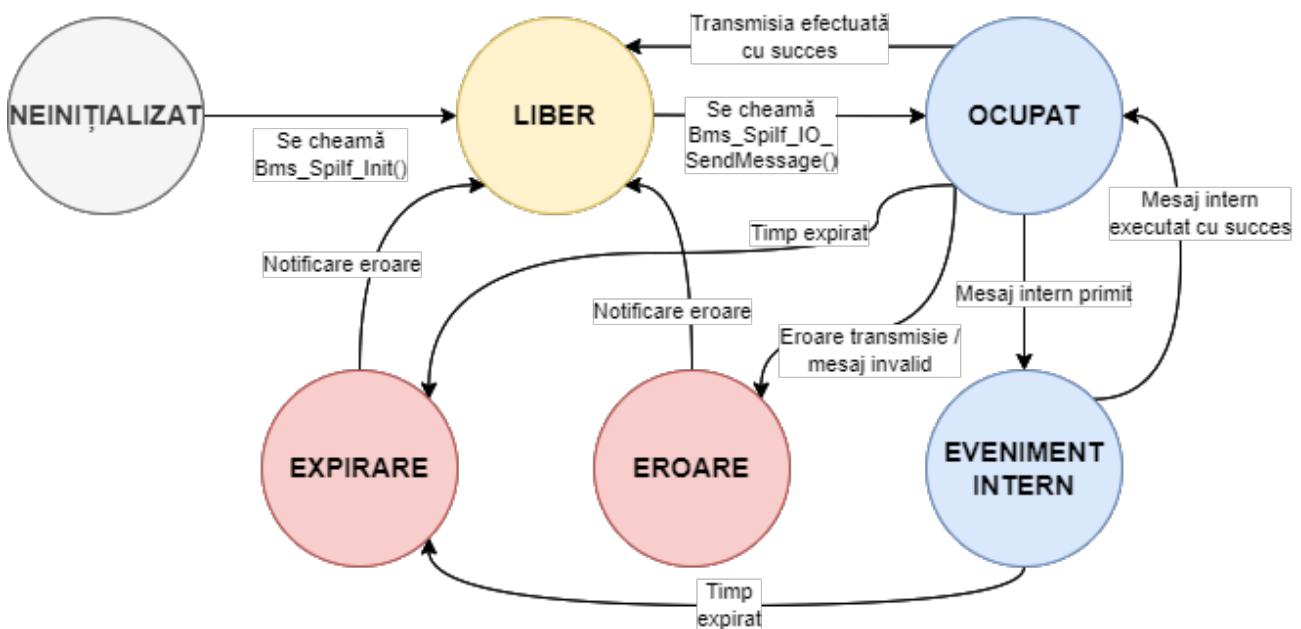


Figura 5.1: Diagrama de stare a driverului Bms\_SpiIf

Acest driver a fost conceput pentru a gestiona comunicația dintre MCU și dispozitivele BCC, iar pentru aceasta, deoarece toate dispozitivele BCC comunică prin SPI, Bms\_SpiIf se folosește de driver-ul SPI din pachetul software RTD. Din acest motiv, sunt folosite concepte definite în standardul AUTOSAR pentru comunicația SPI.

La fel ca în cazul celorlalte pachete software, Bms\_SpiIf oferă o interfață grafică integrată în S32DS pentru configurare.

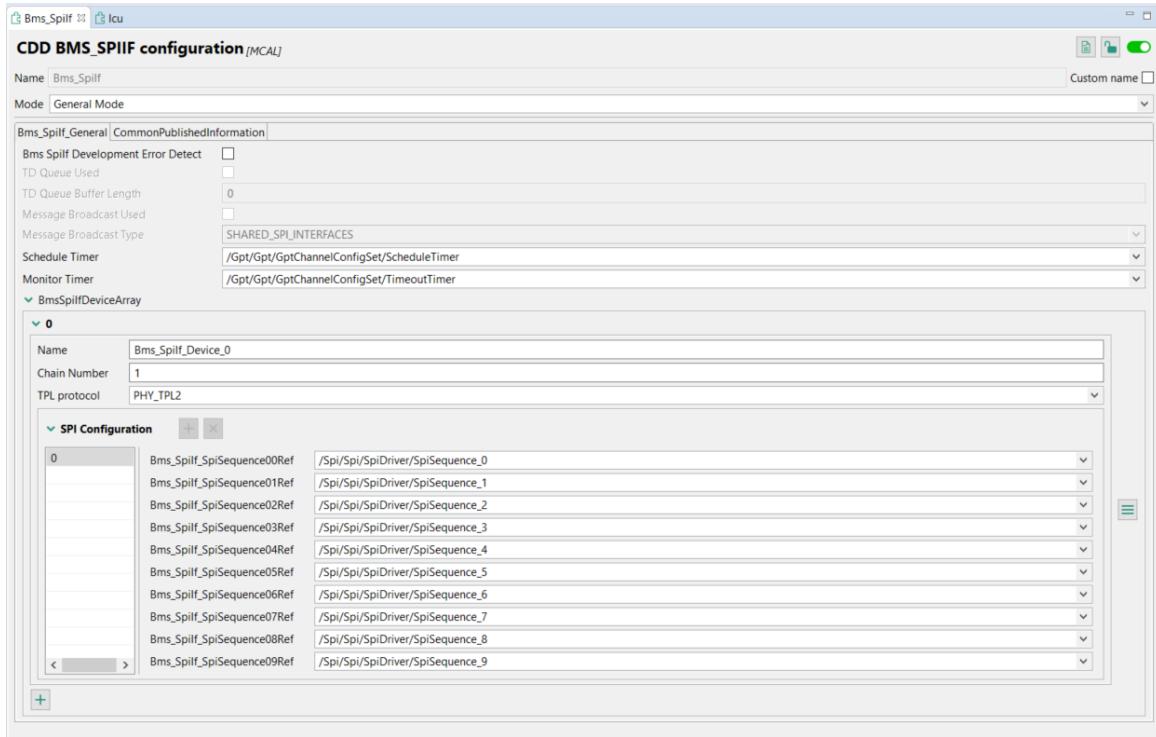


Figura 5.2: Interfață de configurare a componentei Bms\_SpiIf pentru un singur dispozitiv TPL2

Standardul AUTOSAR pentru protocolul de comunicație SPI introduce concepțele de canale, job-uri și secvențe ce au trebuit analizate pentru crearea strategiei de implementare a componentei Bms\_SpiIf. Canalele sunt structuri de date ce stochează datele de transmisie și de recepție, definesc dimensiunea unui cadru SPI și ordinea de transmisie a bitilor. Joburile conțin o listă de canale, dar mai important, acestea conțin referința unui dispozitiv SPI extern ce detine mai multe informații despre comunicația SPI, cum ar fi rata de bit, polaritatea ceasului, tranziția pe care se extrag datele din bufferele interne ale modului SPI, dar și modulul SPI fizic din MCU. În final, o secvență conține o listă de job-uri și permite notificarea finalizării transmisiei prin intermediul unei funcții definite de utilizator.

În urma analizelor, s-a decis ca Bms\_SpiIf să folosească job-uri SPI ce conțin un singur canal. Pentru fiecare dispozitiv configurat, utilizatorul va trebui să configureze 10 canale, 10 joburi și 10 secvențe în componenta SPI. Cele 10 secvențe folosesc un număr incremental de job-uri după cum urmează: prima secvență folosește un singur job, a doua secvență folosește două job-uri și aşa mai departe. Această configurație permite transmisia unui număr variabil de mesaje dependent de ordinea cadrelor din interiorul TD-ului.

Conform arhitecturii BMS, un TD nu trebuie să conțină mesaje exclusiv pentru un singur dispozitiv, acesta fiind capabil de a stoca cadre cu adrese de dispozitiv diferite și chiar adrese de chain diferite. De aceea, Bms\_SpiIf va permite comunicarea cu mai multe dispozitive, rolul componentei fiind analiza cadrelor TPL și rutarea acestora către dispozitivul corect.

Rutarea mesajelor este realizată analizând câmpurile cadrelor TPL, mai exact de interes este câmpul CADD ce descrie adresa de chain.

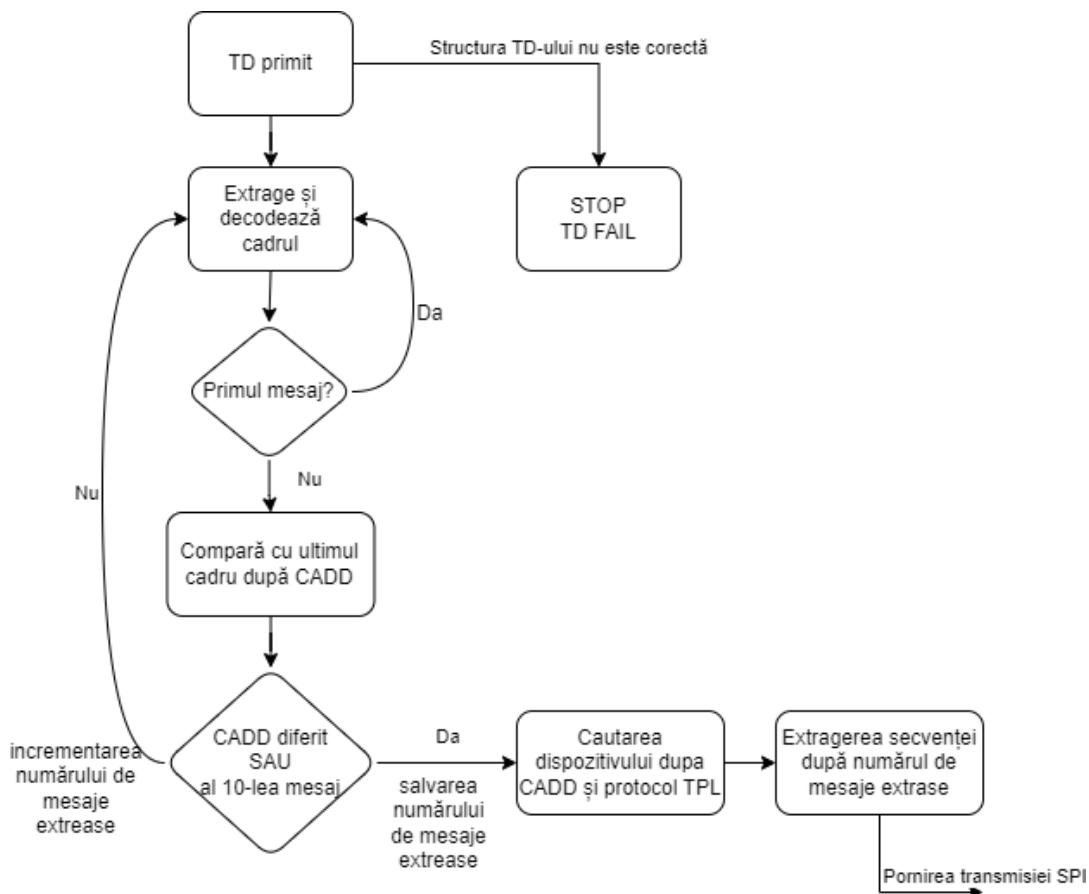


Figura 5.3: Modul de funcționare a componentei Bms\_SpiIf

Execuția lui Bms\_SpiIf este asincronă, permitând aplicației utilizarea procesorului în timpul transmisiei SPI. Procesarea unui TD este pornită atunci când se cheamă funcția Bms\_SpiIf\_IO\_SendMessage, luând ca parametru adresa către TD-ul dorit. După extractia primelor cadre, transmisia SPI este activată, iar procesorul este eliberat pentru a putea fi folosit pentru alte sarcini. Execuția lui Bms\_SpiIf continuă în interiorul întreruperii SPI prin intermediul notificării de la finalul sevențelor SPI.

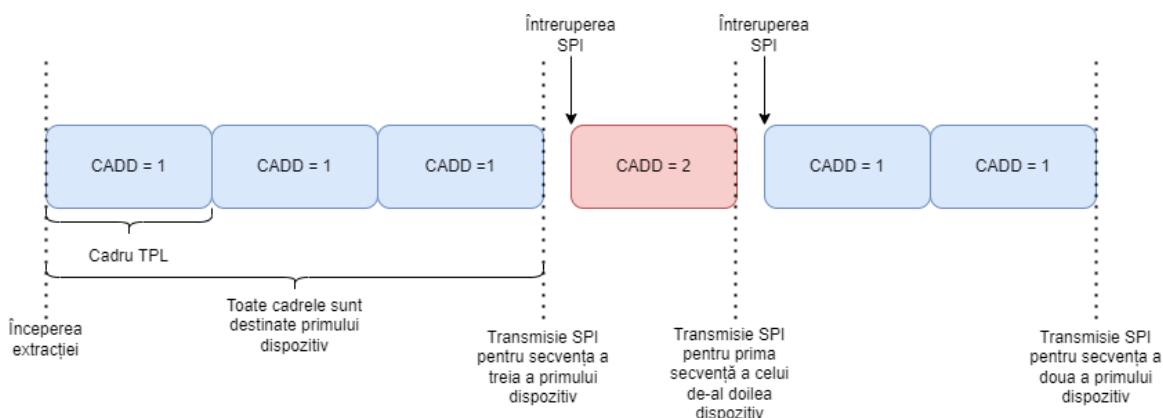


Figura 5.4: Modul de functionare a componentei Bms\_SpiIf

Figura 5.4 prezintă un scenariu ce demonstrează modul de operare al componentei. Bms\_SpiIf extrage pe rând mesajele din interiorul unui TD și decide dacă cadrul analizat este destinat aceluiași dispozitiv ca cel anterior, caz în care continuă extractția. Dacă se acumulează numărul maxim de mesaje sau se detectează un cadrul destinat altui dispozitiv, mesajele acumulate sunt transmise folosind secvența potrivită.

Prin intermediul funcției Bms\_SpiIf\_SchedMessage, componenta poate împacheta în interiorul unui TD un mesaj special, destinat tot componentei având CADD = 0. Acest mesaj este folosit pentru introducerea întârzierilor între mesaje. De exemplu, se poate dori pornirea unei măsurători apoi așteptarea unui anumit timp necesar finalizării acesteia înaintea citirii rezultatelor. Componenta realizează acest lucru folosind numărătorul Scheduler Timer (Figura 5.2) definit în interiorul driver-ului GPT.

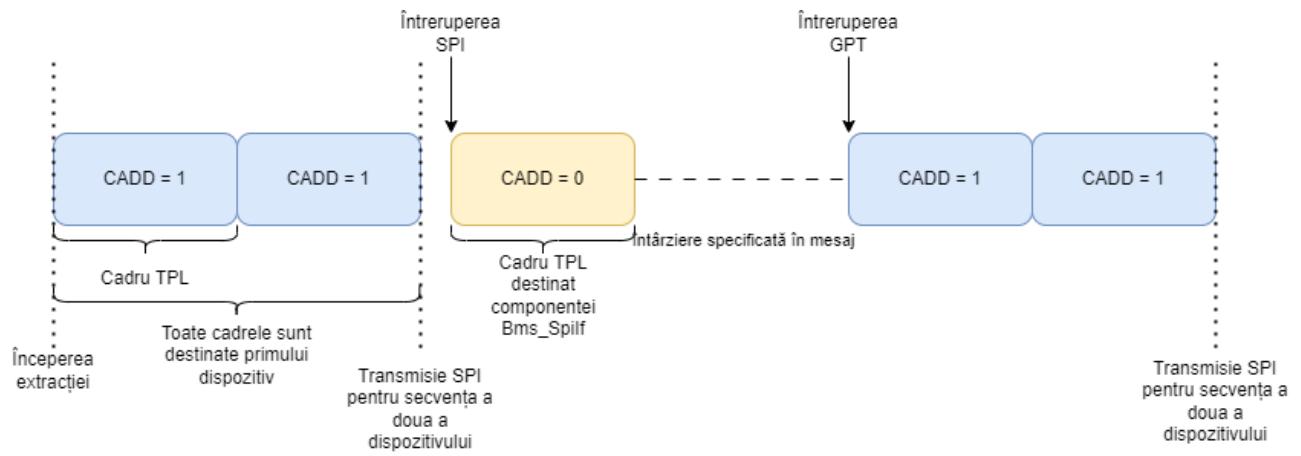


Figura 5.5: Gestionarea mesajelor interne Bms\_SpiIf cu CADD = 0

Bms\_SpiIf conține două referințe către număratoare din interiorul GPT. Primul este Scheduler Timer descris anterior, iar al doilea este Monitor Timer. Cel de-al doilea are rolul de a monitoriza procesarea unui întreg TD. Când procesarea TD-ului este pornită, numărătorul Monitor Timer este pornit astfel încât să numere un interval de timp specificat în câmpul TIMEROUS al TD-ului. Aceasta numără în timp ce TD-ul este procesat și este oprit la finalul procesării. Dacă totuși acesta a ajuns la final cu numărarea înainte ca TD-ul să fie complet procesat, orice transmisie SPI este oprită, iar TD-ul este marcat ca fiind expirat.

Pentru că execuția are loc în întreruperile SPI și GPT, au fost analizate prioritățile acestora. Pentru evitarea problemelor de concurență, modulul SPI trebuie să fie configurat cu o prioritate mai ridicată decât GPT.

## 5.2 Aplicația Low Voltage BMS

Partea practică a acestei lucrări constă și în dezvoltarea unui BMS pentru aplicații ce folosesc tensiuni joase. Deoarece BMS are nevoie de specificații tehnice clare ale sistemului pentru care este dezvoltat, sistemul embedded a fost gândit pentru o baterie Li-Ion de 24V cu o capacitate de 15Ah, ce va alimenta o trotinetă electrică. Software-ul a fost dezvoltat astfel încât specificațiile tehnice ale bateriei să poată fi modificate cu un efort minim.

Sistemul prezentat în această lucrare a fost dezvoltat folosind limbajul de programare C, fiind cea mai populară alegere pentru dezvoltarea aplicațiilor integrate datorită eficienței și a controlului asupra componentelor hardware.

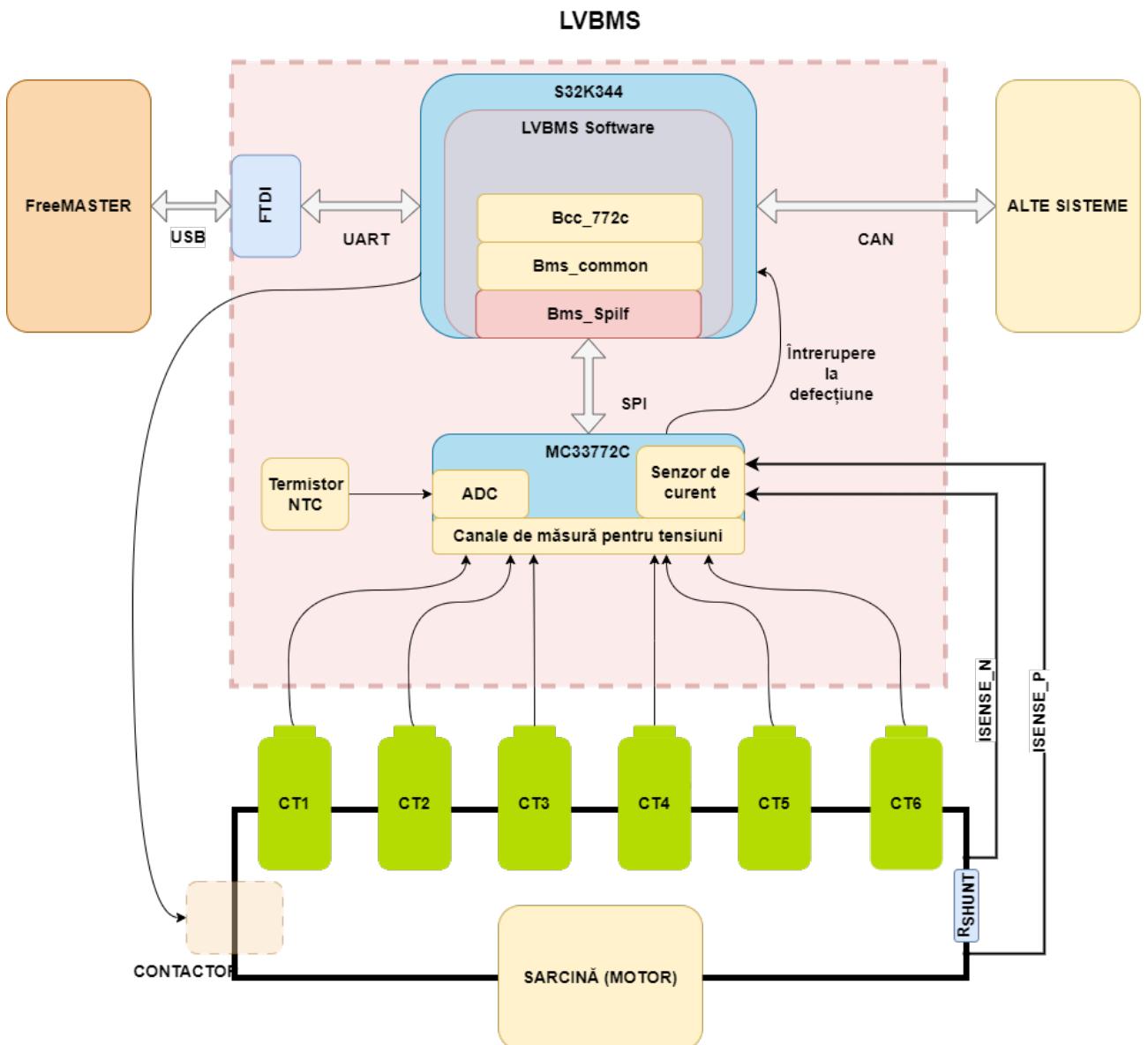


Figura 5.6: Diagrama block a sistemului

Întreg sistemul poate fi descris la nivel înalt prin diagrama din figura 5.6. Chenarul roșu denumit LVBMS (Low Voltage Battery Management System) modelează sistemul de monitorizare, înglobând componentele principale: microcontrolerul S32K344 și integratul MC33772C.

Celulele bateriei  $CT1 - CT6$  sunt modelate folosind emulatorul BATT6-EMULATOR prezentat în capitolul 3.2. Emulatorul permite și simularea curentului, aşadar în realitate nu există rezistorul  $R_{SHUNT}$ . Cu toate acestea, în software este nevoie de a determina curentul pornind de la valoarea tensiunii măsurate, aşadar se va folosi un rezistor fictiv având valoarea  $R_{SHUNT} = 10m\Omega$ . S-a ales această valoare pentru a obține valori ale curentului între  $-15A$  și  $15A$ , valorile tensiunilor măsurate fiind în domeniul  $[-150mV; 150mV]$ .

BMS-ul dezvoltat va măsura tensiunile, temperatura și curentul la intervale fixe de timp, va detecta depășiri ale tensiunilor și va lua decizii pentru a preveni potențialele pericole, va estima SoC și SoH, va efectua echilibrarea celulelor și va comunica cu mediul exterior.

Toate aceste cerințe funcționale necesită o gestionare exactă a timpului și sunt astfel greu de îndeplinit folosind un sistem bare-metal. De aceea se va folosi sistemul de operare în timp real FreeRTOS pentru planificarea și sincronizarea sarcinilor.

### 5.2.1 Interfață grafică

Pentru diagnoza bateriei a fost realizată o interfață grafică prietenoasă pentru vizualizarea datelor celulelor, dar și pentru controlul stării sistemului. Astfel se poate simula pornirea, oprirea și încărcarea unei trotinete electrice folosind butoanele integrate în FreeMASTER.

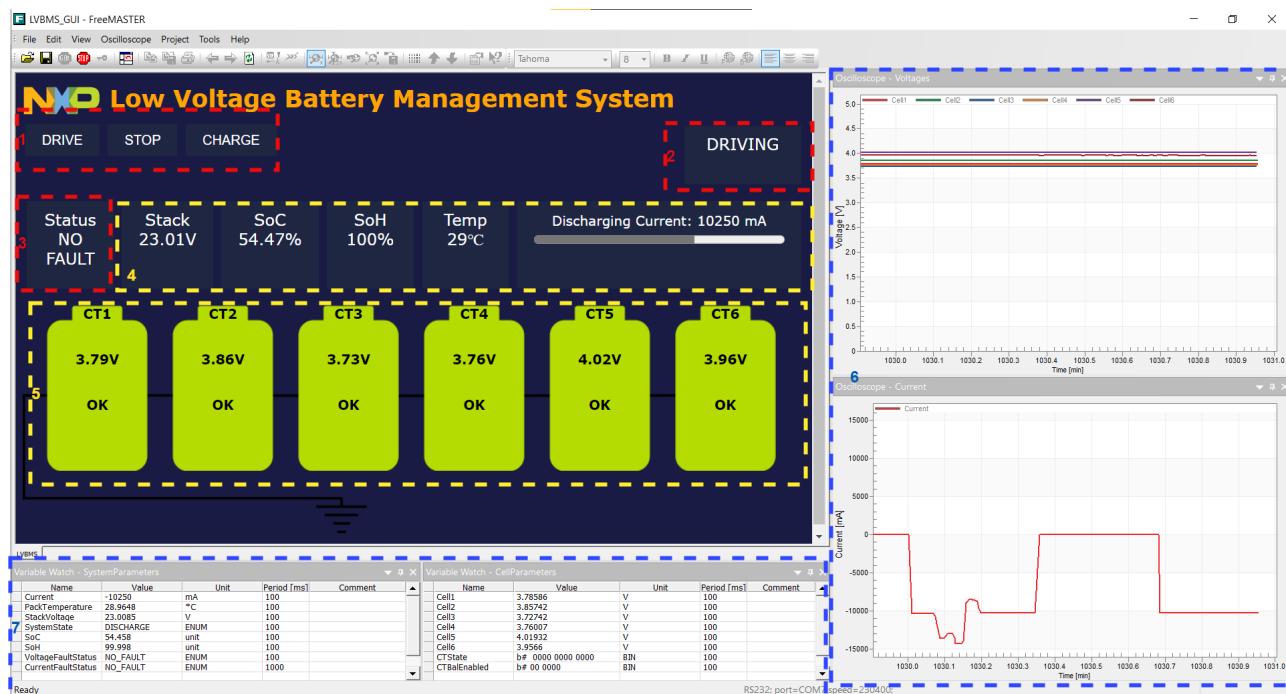


Figura 5.7: Interfață grafică

Figura 5.7 prezintă interfața grafică în secțiuni numerotate. În secțiunea cu numărul 1 se pot găsi butoanele de control ale sistemului, înștiințând BMS despre starea trotinetei simulate, stare ce poate fi observată atât în secțiunea 2, cât și în fereastra SystemParameters sub numele SystemState în secțiunea 7. Secțiunea 3 își poate schimba culoarea în roșu, oferind simultan un mesaj de eroare sugestiv în cazul detectării unei defecțiuni.

Secțiunea 4 prezintă date de interes pentru întreaga baterie: tensiunea la bornele bateriei, starea de încărcare, starea de sănătate, temperatura și valoarea curentului.

În secțiunea 5 sunt descrise date despre celulele individuale: tensiunea fiecărei celule, starea tensiunilor și starea canalelor de echilibrare.

Interfața grafică oferă în partea din dreapta a ecranului ferestre pentru vizualizarea variațiilor tensiunilor și curentului în timp.

În secțiunea 7 se găsesc toate variabilele sistemului ce facilitează schimbul de informație dintre BMS și interfață grafică. Variabilele sunt citite periodic folosind un script JavaScript.

Defecțiunile sunt indicate dinamic indicând cu ajutorul culorilor eroarea detectată. În timpul unei defecțiuni, sistemul este întotdeauna oprit, iar butoanele nu vor avea niciun efect până la remedierea problemei.

FreeMASTER nu ia nicio decizie cu privire la defecțiunile detectate, ci doar prelucrează informațiile primite și le afișează. Câteva scenarii ce pot fi observate în momentul defecțiunilor sunt prezentate în figura 5.8.

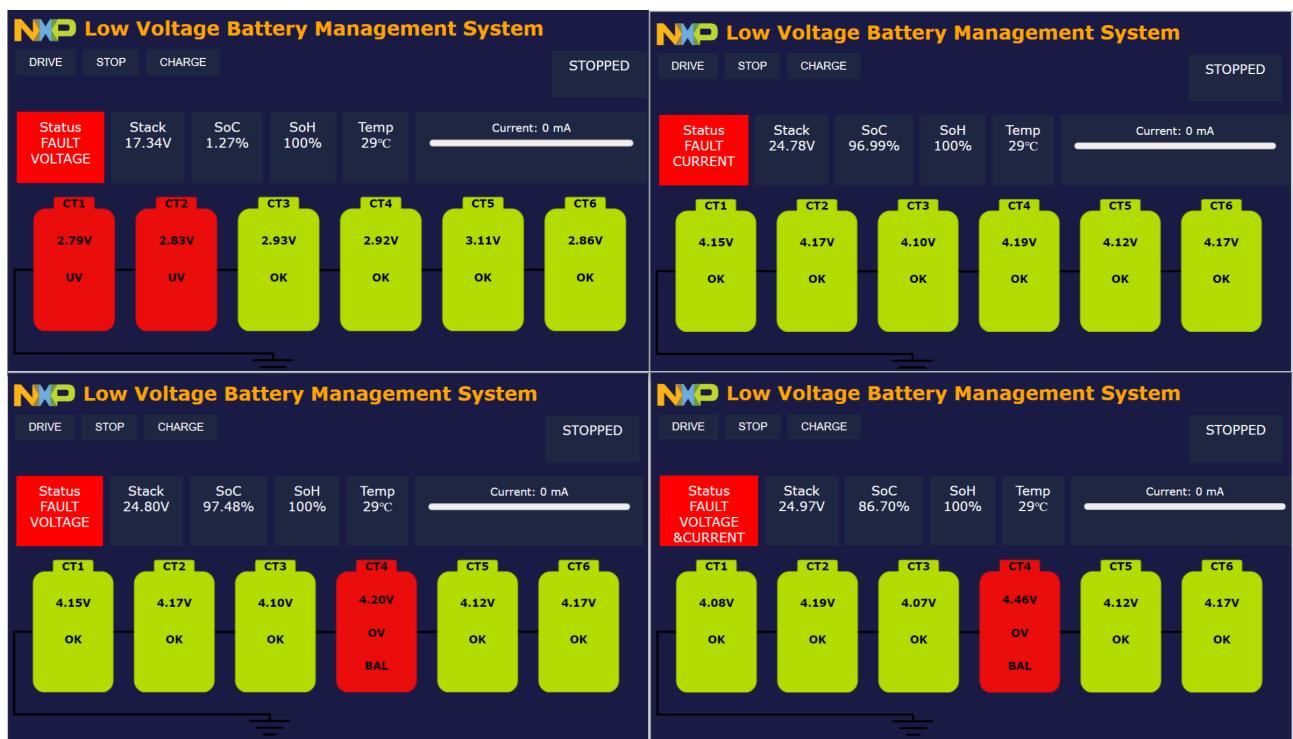


Figura 5.8: Scenarii posibile în timpul unei defecțiuni

Se observă schimbarea culorii celulelor afectate, dar și a informației cu privire la tipul defecțiunii. Celulele ce ating valori situate sub pragul minim permis vor fi acompaniate de textul UV (Under Voltage), iar cele care trec peste pragul maxim vor fi indicate prin textul OV (Over Voltage). Aceste indicații reprezintă detectia unei subtensiuni, respectiv unei supratensouni.

Indicația BAL (BALance) este prezentă atunci când canalul pentru echilibrare al celulei este activ. Echilibrarea va putea fi activă doar în timpul opririi sau încărcării, iar aceasta nu va porni pentru celulele a căror stare de încărcare este foarte scăzută.

### 5.2.2 Implementarea BMS

Scopul aplicației este de a asigura funcționarea corectă a bateriei de 24V a unei trotinete electrice. Pentru demonstrarea funcțiilor sistemului, s-a ales simularea unei baterii formată din acumulatori SAMSUNG 30Q INR18650. Specificațiile tehnice ale acestor celule se găsesc în tabelul 5.1.

Parametru	Valoare
Modelul acumulatorului	SAMSUNG 30Q INR18650
Metoda de încărcare	CC-CV
Curent de încărcare maxim	4A
Curent de descărcare maxim	15A
Capacitate	3000mAh
Tensiunea nominală	3.6V

Tabela 5.1: Specificațiile acumulatorilor SAMSUNG 30Q INR18650

Pentru a putea alimenta trotineta electrică fictivă, bateria va trebui să conțină acumulatorii conectați în serie și în paralel pentru a obține tensiunea de 24V și capacitatea de 15Ah. Configurația celulelor este astfel 6 x 5, 6 nivele serie și 5 nivele paralel. Nivelele serie contribuie la creșterea tensiunii, iar nivelele paralel ajută la creșterea capacitatii.

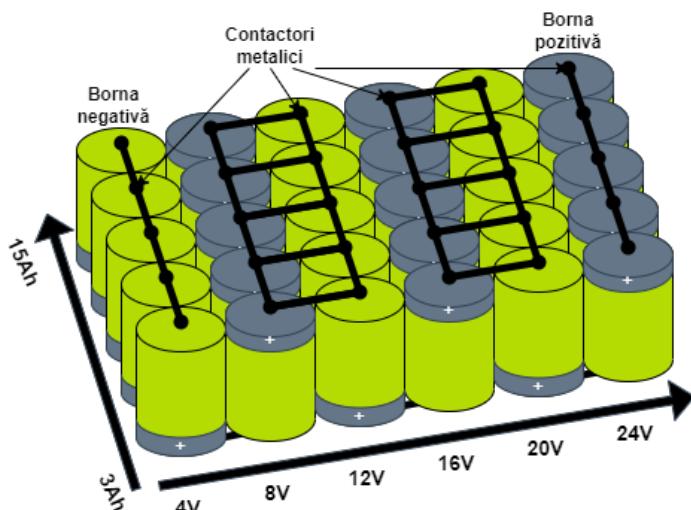


Figura 5.9: Proiectarea bateriei de 24V a trotinetei electrice

Cele 5 celule conectate în paralel vor avea aceeași tensiune, obținând 6 tensiuni individuale care trebuie monitorizate. Integratul MC33772C este perfect pentru această cerință având un maxim de 6 canale de măsură. Nimic nu ne oprește din a conecta mai multe integrate MC33772C pentru monitorizarea celulelor, driverul Bms\_SpiIf suportând comunicarea cu mai multe dispozitive BCC, însă costul implementării este mai ridicat și complexitatea sistemului crește de asemenea, fără a crește mult eficiența sistemului. Două dispozitive pot fi folosite în acest caz pentru obținerea unei siguranțe ridicate efectuând măsurători redundante și comparând rezultatele.

Pentru a putea folosi driverele din pachetele software menționate în secțiunile 4.2 și 4.3 a fost nevoie de integrarea acestora în mediul de dezvoltare S32DS și configurarea fiecărui driver. Configurarea se realizează cu ajutorul interfeței grafice de care dispune fiecare driver și constă în activarea sau dezactivarea anumitor funcții software, crearea de obiecte specifice standardului AUTOSAR, activarea perifericelor folosite, configurarea întreruperilor și alte cerințe specificate în manualele modulelor folosite. Pe baza configurațiilor, fiecare driver generează fișiere sursă în limbajul de programare C ce sunt folosite atât de driver, cât și de aplicația dezvoltată.

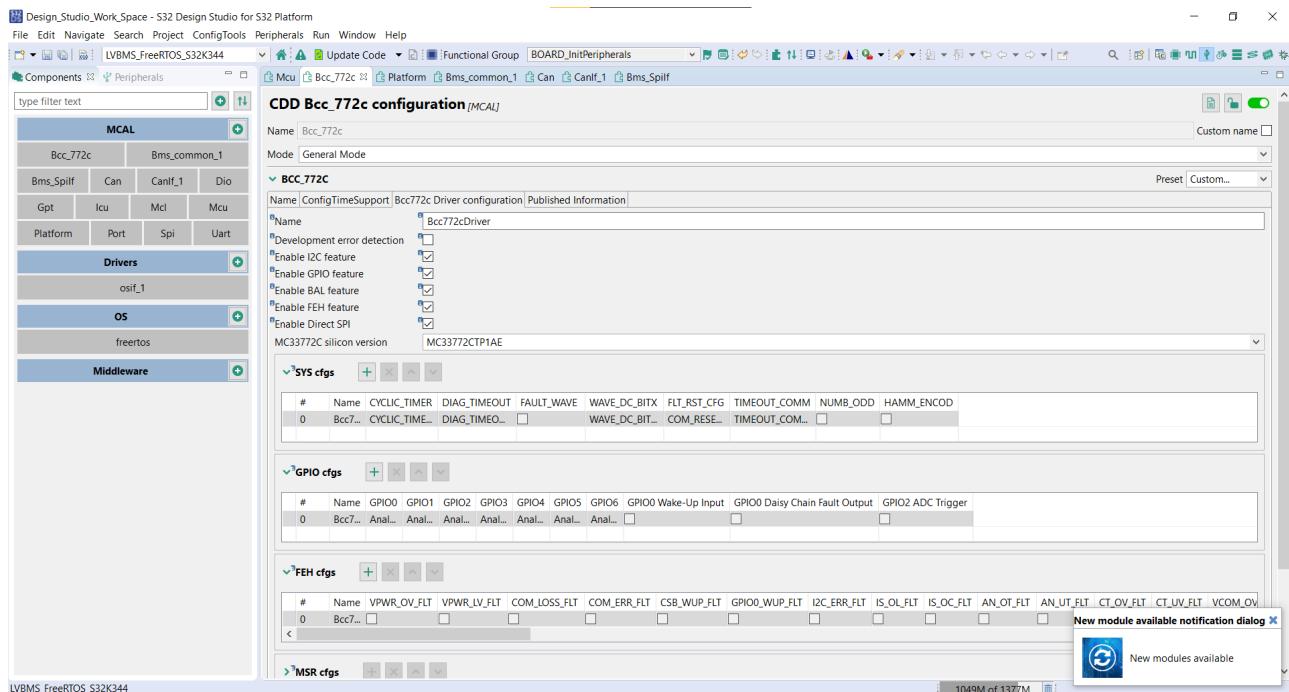


Figura 5.10: Pagina de configurare a driverului Bcc\_772c

Figura 5.10 ilustrează interfața de configurare pentru driverului Bcc\_772c folosit pentru controlul integratului MC33772C. În partea din stânga a imaginii pot fi observate toate modulele ce au fost configurate pentru implementarea aplicației LVBMS.

Pentru a facilita comunicația eficientă cu dispozitivul s-au creat 3 descriptori de transmisie (Tranzaction Descriptors - TD) în interiorul paginii de configurare a driverului Bms\_common.

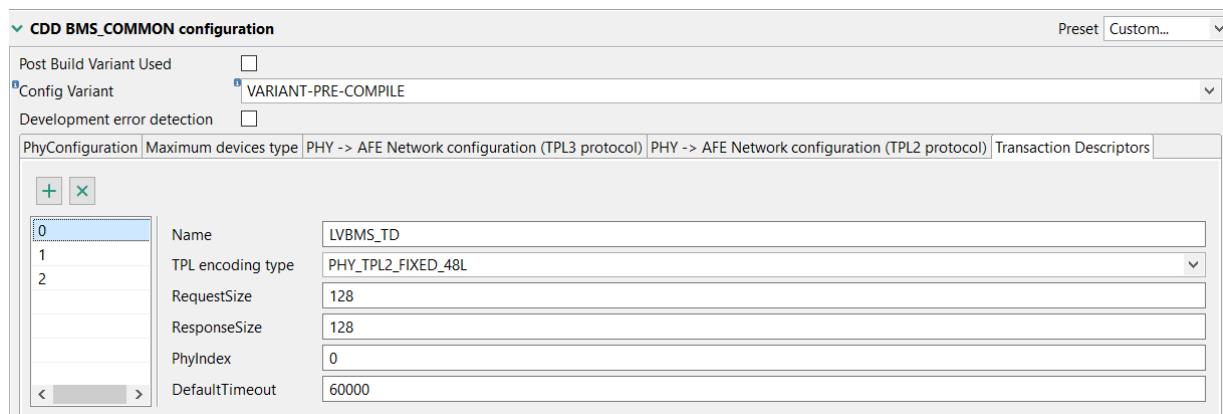


Figura 5.11: Configurarea descriptorilor de transmisie în pagina de configurare a driverului Bms\_common

Cerințele aplicației sunt îndeplinite folosind 3 sarcini ce rulează paralel cu ajutorul programatorului sistemului de operare FreeRTOS: LVBMS\_MeasureTask este responsabilă pentru măsurarea parametrilor celulelor, LVBMS\_FaultControlTask este responsabil pentru deciziile sistemului, iar LVBMS\_FaultHandlerTask are rolul de a detecta și notifica sarcina de control despre defectiunile detectate.

Sistemul de operare FreeRTOS permite fiecărei sarcini să fie executată timp de 1ms, urmând apoi o comutare de context pentru a permite executarea următoarei sarcini. Comutarea se face ciclic, însă sistemul de operare permite atât suspendarea unei sarcini, cât și execuția altora dacă sarcina curentă are nevoie să aștepte un anumit interval de timp.

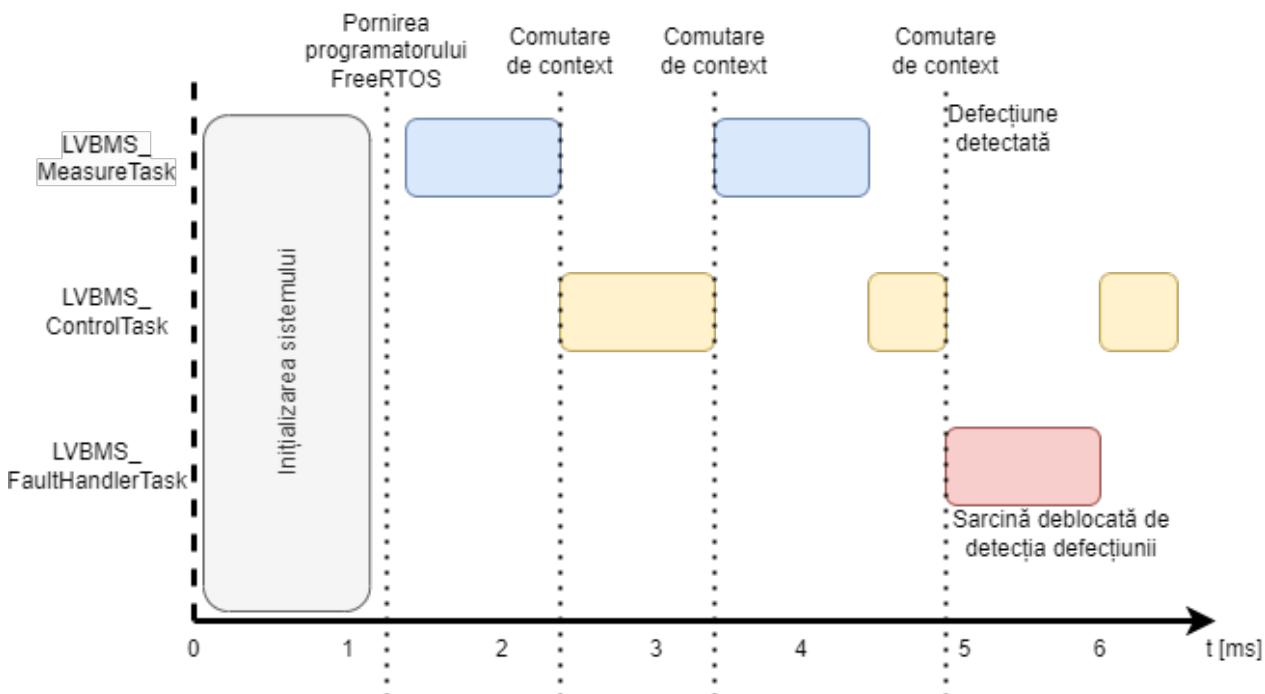


Figura 5.12: Execuția aplicației Low Voltage Battery Management System

În figura 5.12 este descris modul de execuție al aplicației. Sarcinile sistemului vor fi pornite de programatorul sistemului de operare odată ce inițializarea sistemului este finalizată. Se poate observa însă că sarcina LVBMS\_FaultHandlerTask nu începe execuția imediat după inițializarea sistemului. De fapt, ideal această sarcină nu ar trebui să ruleze deloc, deoarece execuția acesteia este acompaniată de o defectiune a sistemului. Mai multe detalii despre funcționarea sarcinii sunt specificate în secțiunea 5.2.6.

### 5.2.3 Inițializarea sistemului

Inițializarea sistemului constă în apelarea funcțiilor de inițializare ale modulelor folosite, funcții ce au rolul de a aplica configurațiile alese din interfața grafică a mediului de dezvoltare S32DS. Pe lângă chemarea funcțiilor de inițializare, sistemul trebuie să comunice cu dispozitivul MC33772C extern microcontrolerului pentru a configura integratul corespunzător. Folosind dispozitivul proaspăt configurat, sistemul va estima starea de încărcare inițială ale bateriei, fiind un pas esențial pentru funcționarea corectă și acuratețea algoritmului pentru determinarea SoC și SoH descris în secțiunea 5.2.5.

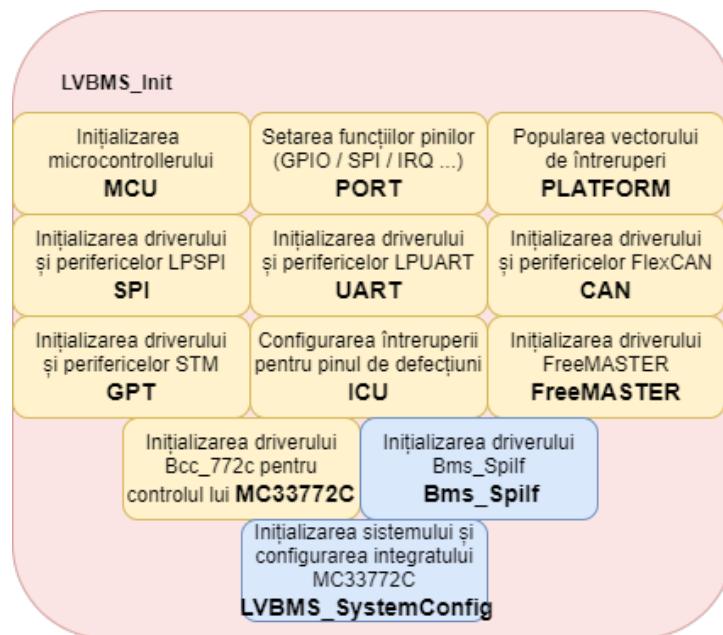


Figura 5.13: Procesul de inițializare al sistemului Low Voltage Battery Management System

Figura 5.13 descrie sarcinile pe care le îndeplinește funcția LVBMS\_Init. Culoarea albăstră indică sarcinile ce sunt îndeplinite folosind implementarea proprie. Restul sarcinilor sunt îndeplinite de modulele software ale pachetelor RTD și BMS.

Configurarea sistemului presupune comunicarea cu dispozitivul extern și estimarea stării de încărcare a bateriei. Deoarece procesul de comunicare poate fi întâmpinat de erori fie legate de corectitudinea datelor, fie erori apărute pe linia de transmisie, funcția LVBMS\_SystemConfig este chemată ciclic până procesul a fost finalizat fără a fi afectat de erori. Erorile întâmpinate sunt raportate folosind structura de date LVBMS\_ErrorType.

Figura 5.14 descrie ordinea operațiilor efectuate de funcția LVBMS\_SystemConfig, dar și erorile detectate în timpul procesului.

Înainte de a putea fi folosit, integratul MC33772C trebuie adus în starea de operare normală trimînd o secvență de mesaje de trezire. Această secvență este urmată de o scriere a adresei alocate în registrul de inițializare a integratului, acțiune ce reprezintă procesul de enumerare (numele este mai potrivit pentru sisteme cu mai multe dispozitive). Dispozitivul trebuie trezit și enumerat de fiecare dată când comunicația nu are loc timp de o secundă.

Dacă enumerarea a fost finalizată cu succes, folosind funcțiile implementate în driverul

Bcc\_772C, sunt împachetate în descriptorul de tranzacție mesajele ce conțin configurațiile alese în interfață grafică, iar apoi transmise cu ajutorul componentei Bms\_SpiIf.

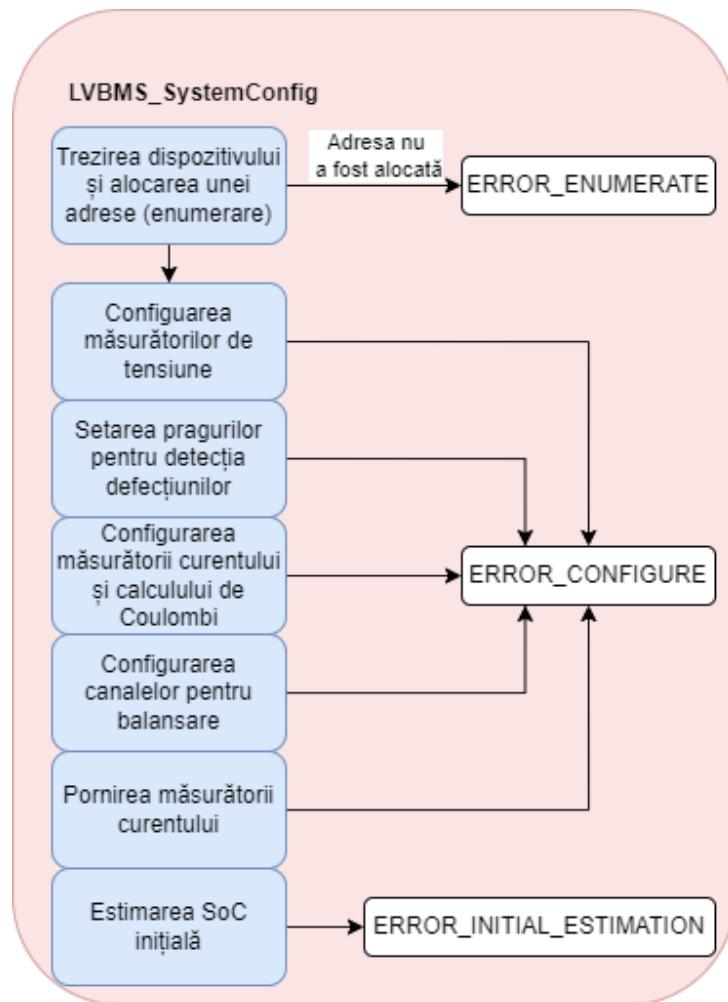


Figura 5.14: Procesul de configurare al sistemului împreună cu integratul MC33772C

Dispozitivul este configurat pentru a efectua măsurători ciclice continue care afectează doar regisṭrii de stare ai dispozitivului. Acest lucru este folositor pentru detecția defectiunilor și în momentele în care sarcinile sistemului sunt ocupate, permitând tratarea imediată a defectiunilor.

Măsurarea curentului este asincronă față de măsurarea canalelor pentru tensiuni. Din acest motiv, măsurătorile curentului sunt pornite imediat, fiind util pentru procesul de numărare al Coulombilor ce depinde de măsurarea curentului.

La finalul inițializării este determinată starea de încărcare a bateriilor folosind curba de variație OCV - SoC (Open Circuit Voltage) ce descrie cum se modifică starea de încărcare în funcție de tensiunea bateriei fără sarcină prezentă la bornele sale. Detaliile acestei metode sunt prezentate în secțiunea 5.2.5.

## 5.2.4 Măsurarea tensiunilor, curentului și temperaturii

Sarcina LVBMS\_MeasureTask se ocupă cu măsurarea tuturor parametrilor celulelor. Mai exact, rolul principal al sarcinii este acela de a porni conversiile analog-digital ale canalelor de măsură prezente în MC33772C, de a citi și prelucra rezultatele.

Măsurătorile sunt ciclice, sarcina fiind programată să ruleze o dată la 5ms. Un mesaj pentru pornirea conversiilor analog-digital este transmis dispozitivului, iar acesta are nevoie de 2ms pentru a finaliza toate măsurătorile. MC33772C poate efectua media mai multor eșantioane, sporind astfel acuratețea măsurătorilor. În această aplicație este aplicată medierea a două eșantioane pentru fiecare parametru măsurat.

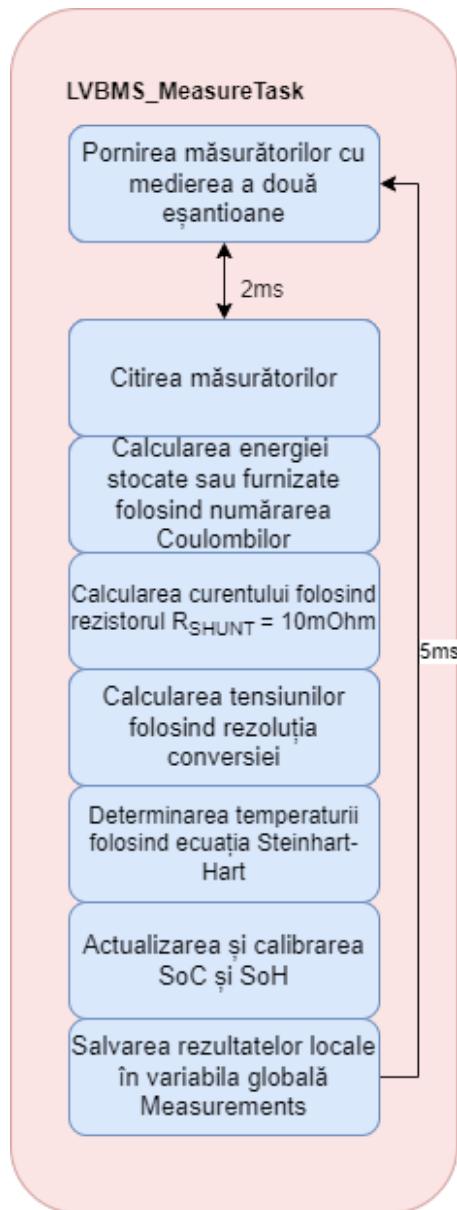


Figura 5.15: Măsurarea și calculul parametrilor celulelor

Reștricții în care sunt stocate rezultatele au dimensiunea de 16 biți, însă bitul cel mai semnificativ este folosit pentru a semnaliza finalizarea procesului de măsură, astădat registri ar trebui citiți doar atunci când acest bit are valoarea 1. Rezultatele sunt reprezentate în restul de 15 biți și pot fi interpretate ca valori fără semn sau valori în formatul complement față de 2.

Tensiunile celulelor și tensiunile aplicate canalelor de măsură de uz general sunt întotdeauna pozitive, iar domeniul de valori numerice ale acestora este [0 : 32.767].

Curentul este stocat în doi registrii, partea cea mai semnificativă aflându-se în primul regisztru, iar restul de 4 biți în cel de-al doilea regisztru. Astfel, rezultatul curentului are dimensiunea de 19 biți. Rezultatul poate lua valori pozitive și negative și este reprezentat în formatul complement față de 2 pentru a putea reprezenta curenții de descărcare și de încărcare. Astfel, rezultatele obținute vor avea valori în domeniul [-262.144 : 262.143]. Semnul curentului este dat de modul de conectare al pinilor ISENSE\_N și ISENSE\_P ai integratului MC33772C, dar în general se realizează conexiunile astfel încât valoarea pozitivă să corespundă curentului de încărcare, iar cea negativă să corespundă curentului de descărcare. Această convenție este respectată și în această lucrare.

Pentru a converti valorile numerice în tensiuni se folosesc rezoluțiile specificate în manualul de utilizare al dispozitivului. Pentru canalele de măsură ale tensiunilor se folosesc rezoluția 152,58789 mV/LSB, iar pentru canalul de măsură al curentului se folosesc rezoluția 600 nV/LSB. Astfel, se pot obține cu valori între [0V : 5V] pentru canalele de măsură pentru tensiuni, și valori între [-157,286mV : 157,285mV] pentru valoarea tensiunii ce cade pe  $R_{SHUNT}$ .

Deoarece cerința sistemului este aceea de a putea măsura curenții de încărcare și descărcare de aproximativ 15A, avem nevoie de un rezistor  $R_{SHUNT} = 10m\Omega$ . Astfel, împărțind valorile tensiunilor măsurate la bornele rezistorului la valoarea acestuia se obțin valori de curenți în domeniul [-15,728A : 15,728A]. Valoarea mică rezistorului asigură pierderi minime și permite obținerea intervalului de valori ideal. Un curent mai mare nu va putea fi măsurat, însă BMS nu va permite un curent mai mare de 15A.

Pentru determinarea temperaturii este nevoie mai întai de a determina valoarea rezistenței termistorului NTC folosind metoda descrisă în secțiunea 2.3.2, știind că acesta formează un divizor rezistiv cu un alt rezistor cu valoarea  $R = 6.8k\Omega$ . Folosind valoarea rezistorului la temperatura de  $25^{\circ}C$  și valoarea  $\beta = 3380$  specificate în foaia de catalog, putem rezolva ecuația  $\beta$  pentru determinarea temperaturii.

### 5.2.5 Algoritmul pentru determinarea SoC și SoH

Determinarea stării de încărcare și stării de sănătate ale bateriei sunt realizate în interiorul sarcinii LVBMS\_MeasureTask după achiziția măsurătorilor.

Pentru determinarea SoC s-a folosit o combinație între metoda curbei de variație OCV - SoC (2.5.1) și numărărarea Coulombilor (2.5.1). Acuratețea stării de încărcare depinde foarte mult de estimarea inițială SoC, de aceea s-a ales folosirea metodei OCV - SoC pentru determinarea stării inițiale, numărarea Coulombilor fiind folosită în timpul funcționării sistemului.

Pentru estimarea inițială a SoC, au fost folosite valorile curbei de variație specificate în foaia de catalog a acumulatorului SAMSUNG 30Q INR18650. Valorile folosite au fost luate din lucrarea [15], lucrare ce a inspirat alegerea tipului de baterie folosit pentru demonstrarea funcționării practice a aplicației.

Curba de variație este împărțită în doi vectori cu dimensiunea de 20 de elemente fracționare (80 bytes) salvate în memoria ROM (Read Only Memory) a microcontrolerului, unul dintre ei

conținând valorile stărilor de încărcare, iar celălalt valorile tensiunii. Cele două valori sunt correlate cu ajutorul poziției pe care se află să cum este descris în figura 5.16. Astfel, măsurând tensiunea celulei, se poate determina poziția celei mai apropiate tensiuni din interiorul vectorului OCV\_LookUpTbl, iar această poziție este folosită pentru atribuirea stării de încărcare pentru celula respectivă. Starea de încărcare a întregii baterii este media stărilor celor 6 celule.

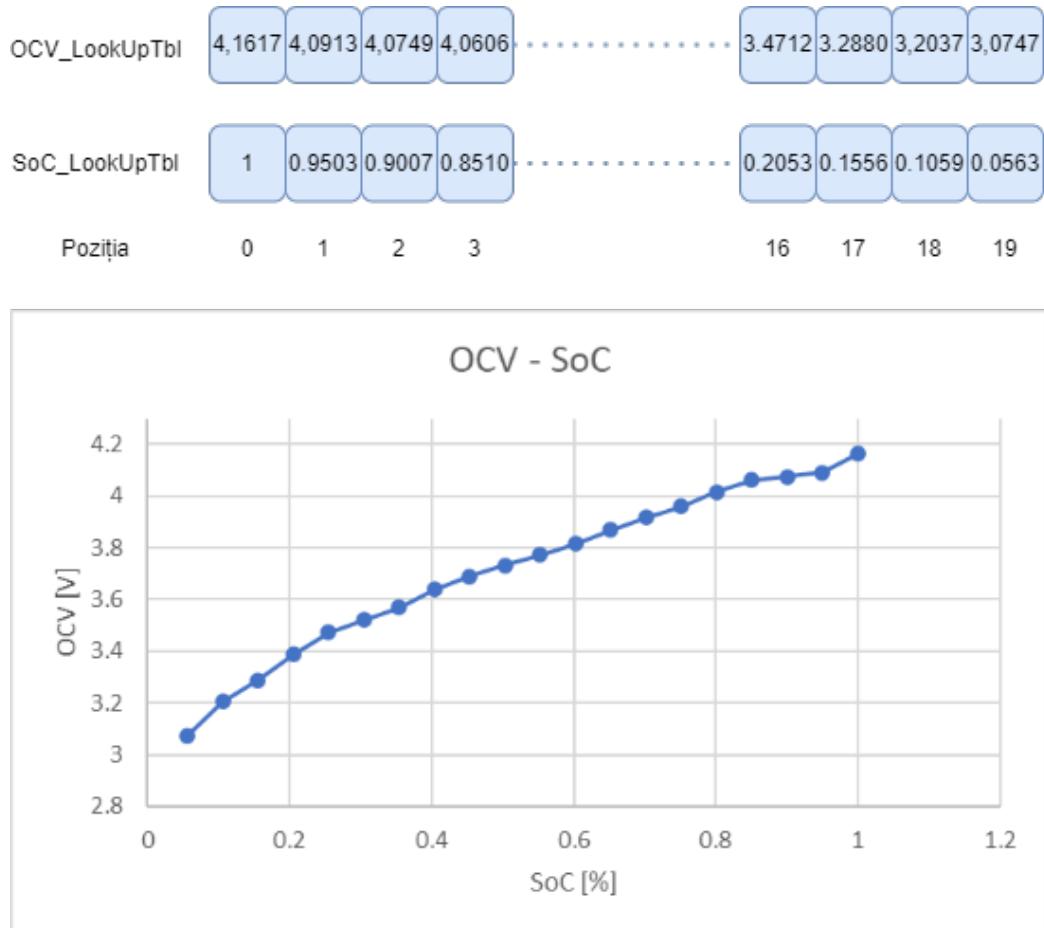


Figura 5.16: Curba de variație OCV - SoC a celulei SAMSUNG 30Q INR18650

Pentru a măsura tensiunile celulelor este nevoie să se comunice cu dispozitivul pentru a porni conversiile analog-digital și citi rezultatele acestora. Problema principală în cazul de față este timpul de așteptare de 2ms. Deoarece sistemul de operare FreeRTOS nu a pornit în această fază inițială, nu putem folosi metodele de gestionare ale timpului existente în sistemul de operare. De aceea, pentru a nu folosi încă o resursă suplimentară a microcontrolerului, se folosesc mesajele interne ale driverului Bms\_SpiIf ce introduc o întârziere între mesajele transmise dispozitivului MC33772C.



Figura 5.17: Cadrele TPL împachetate pentru măsurarea inițială a tensiunilor

După estimarea inițială a stării de încărcare, algoritmul pentru determinarea SoC se folosește de numărătorul de Coulombi al lui MC33772C. Integratorul este configurat pentru a reseta

numărătorul intern de fiecare dată când se citește o secvență de registrii. Dacă aceasă secvență de registri nu este citită suficient de des, numărătorul va ajunge la valoarea maximă și se va resetă, reluând numărătoarea de la valoarea 0, asa cum se ilustrează în figura 5.18.

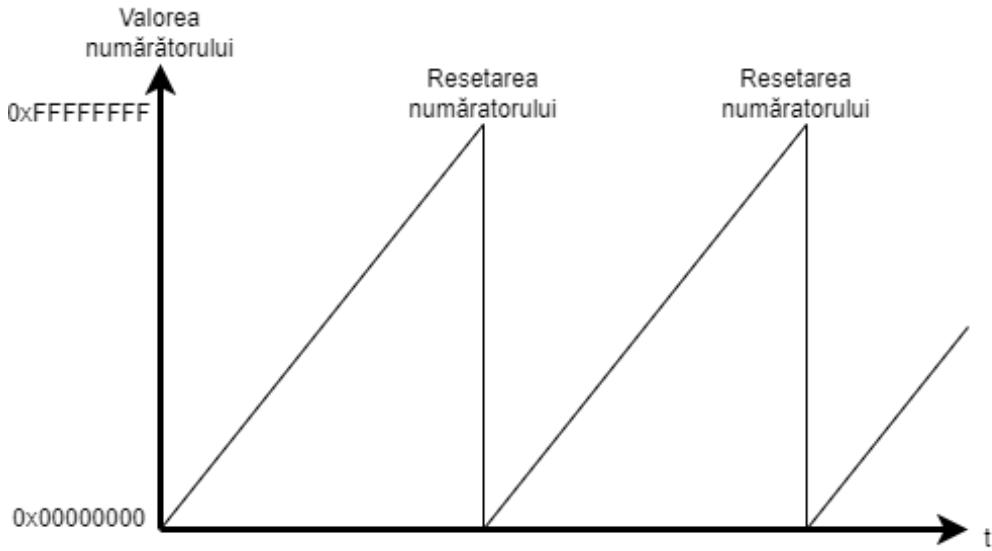


Figura 5.18: Principiul de funcționare al numărătorului de Coulombi

Numărătorul de Coulombi permite determinarea curentului mediu cu ajutorul căruia putem afla sarcina electrică. Primul pas este citirea celor doi registri (COULOMB\_CNT1 și COULOMB\_CNT2) ce conțin valoarea numărătorului pe 64 de biți. Valoarea numărătorului reprezintă integrala discretă a curentului pe intervalul de timp al numărării. Intervalul de timp este reprezentat de numărul de eșantioane folosite de la ultima citire, salvat în registrul CC\_NB\_SAMPLES. Dacă înmulțim valoarea numărătorului cu rezoluția specificată în manualul de utilizare obținem unitatea  $\mu V$ , iar împărțind la valoarea rezistorului  $R_{SHUNT}$  putem exprima rezultatul în Amperi.

Deoarece configurația numărătorului de Coulombi folosită în această lucrare determină resetarea cu fiecare citire a celor 3 registrii menționați anterior, sarcina electrică se poate determina la fiecare citire, fiind nevoie doar de salvarea timpului la care s-a efectuat citirea anterioară, nu și valorile regiștrilor. În figura 5.19 se descrie grafic algoritmul pentru determinarea sarcinii electrice.

Folosind sarcina electrică determinată anterior putem actualiza starea de încărcare, dar și starea de sănătate, cunoștând relația dintre aceste mărimi:

$$SoC(t) = SoH(t) - DoD(t),$$

unde s-a introdus mărimea DoD (Depth of Discharge) exprimată în procente care reprezintă capacitatea ce a fost descărcată raportată la capacitatea nominală a bateriei.

Pe parcursul execuției se poate actualiza SoC și SoH indirect prin DoD, aceasta fiind actualizată folosind sarcina electrică determinată anterior și raportată la capacitatea bateriei pentru exprimarea valorii în procente. Algoritmul ia în considerare sensul curentului, dar și limitele de operare ale bateriei pentru a actualiza stările corespunzătoare în cazul deteriorării bateriei. Algoritmul folosit pentru determinarea stării de încărcare și de sănătate este prezentat în figura 5.20.

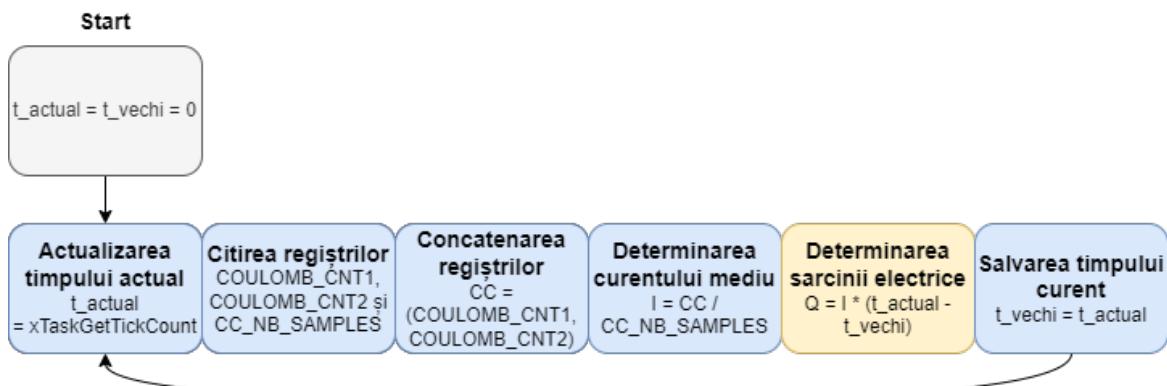


Figura 5.19: Algoritmul folosit pentru determinarea sarcinii electrice

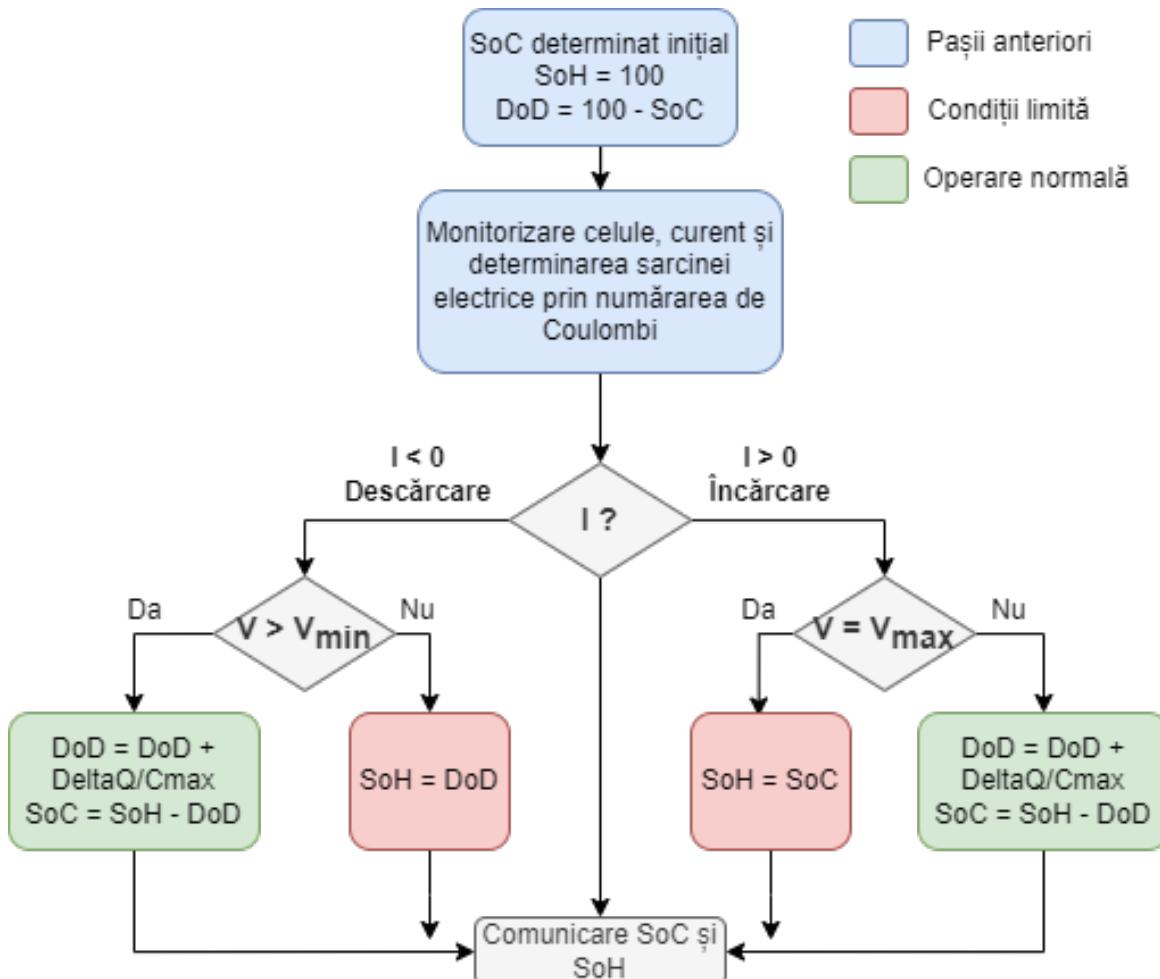


Figura 5.20: Algoritmul folosit pentru determinarea stărilor de încărcare (SoC) și de sănătate (SoH)

### 5.2.6 Detectia supratensiunilor si subtensiunilor

Sarcina LVBMS\_FaultHandlerTask este responsabilă cu detectia subtensiunilor și supratensiunilor. Funcționalitatea sa se bazează pe notificarea de către MC33772C prin intermediul unui pin conectat la microcontrolerul S32K344. Integratul poate notifica diverse defectiuni prin intermediul acestui pin, astfel se poate detecta o astfel de defectiune monitorizând pinul și acționând la detectia unei tranziții de nivel de la 0 logic la 1 logic. MC33772C poate detecta probleme precum tensiuni de alimentare anormale, depășirea pragurilor impuse pentru canalele de măsură, dar și erori de comunicație sau resetarea unor registrii. În pagina de configurare a integratului MC33772C se pot selecta cauzele care determină tranzițiile pinului, iar în această lucrare au fost configurate doar depășirile pragurilor pentru tensiunile celulelor.

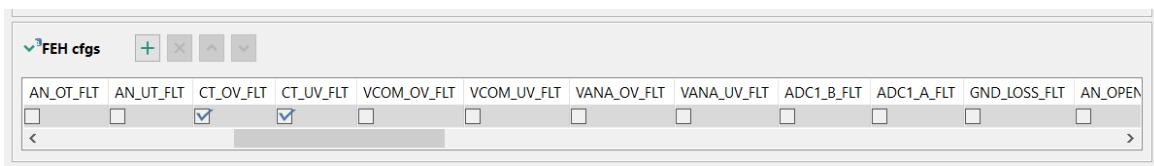


Figura 5.21: Configurația cauzelor ce determină tranziții ale pinului FAULT al integratului MC33772C

Cu ajutorul pinului putem salva timpul de procesare ce ar fi fost alocat sarcinii pentru compararea software a pragurilor impuse. Astfel, sarcina LVBMS\_FaultHandlerTask este suspendată încă de la începutul programului, deblocarea sa fiind realizată de un semafor eliberat în interiorul intreruperii modulului ICU. Cu alte cuvinte, sarcina este executată doar pe durata defectiunii.

Rolul sarcinii nu este de a remedia defectiunile, ci doar de a identifica cauza acestora. Acest lucru se realizează prin inițierea unui schimb de mesaje cu dispozitivul MC33772C. Driverul Bms\_SpiIf nu permite prelucrarea simultană a mai multor descriptori de transmisie și va returna o eroare dacă se apelează metoda Bms\_TD\_Send în timpul unei transmisii. Pentru a evita această eroare, s-a protejat apelarea acestei funcții cu ajutorul unui semafor care asigură o execuție atomică a driverului Bms\_SpiIf.

Pentru identificarea defectiunilor se citește inițial registrul general de eroare. Conținutul acestui registru este format din mai mulți biți ce indică cauza sau cauzele erorii. Astfel, verificând conținutul acestui registru, putem restrânge căutarea, direcționând atenția către zona afectată. De exemplu, dacă bitul ce indică detectia unei supratensiuni este setat, putem să verificăm conținutul registratorului CELL\_OV\_FLT pentru a afla care sunt celulele ale căror tensiuni au depășit pragurile impuse. De interes pentru această aplicație sunt primii doi biți ai registratorului general de eroare, primul indicând o subtensiune, iar celălalt o supratensiune. După identificarea celulelor problematice se salvează starea acestora pentru a putea fi transmise către interfață grafică sau către alte module din sistem. Citirea registratorilor nu este suficientă pentru a reseta biții, de aceea, pentru ștergerea erorii este nevoie de transmisia unui mesaj cu comandă de scriere conținând valoarea 1 pe pozițiile celor 6 biți asociați fiecărei celule. Integratul va seta din nou biții resetăți dacă eroarea nu a fost remediată între timp. Schema bloc a procesului de identificare a defectiunilor este prezentată în figura 5.22.

Algoritmul de identificare a fost conceput pentru scalabilitate, putând fi adăugate oricâte verificări similare fără a depune un efort ridicat.

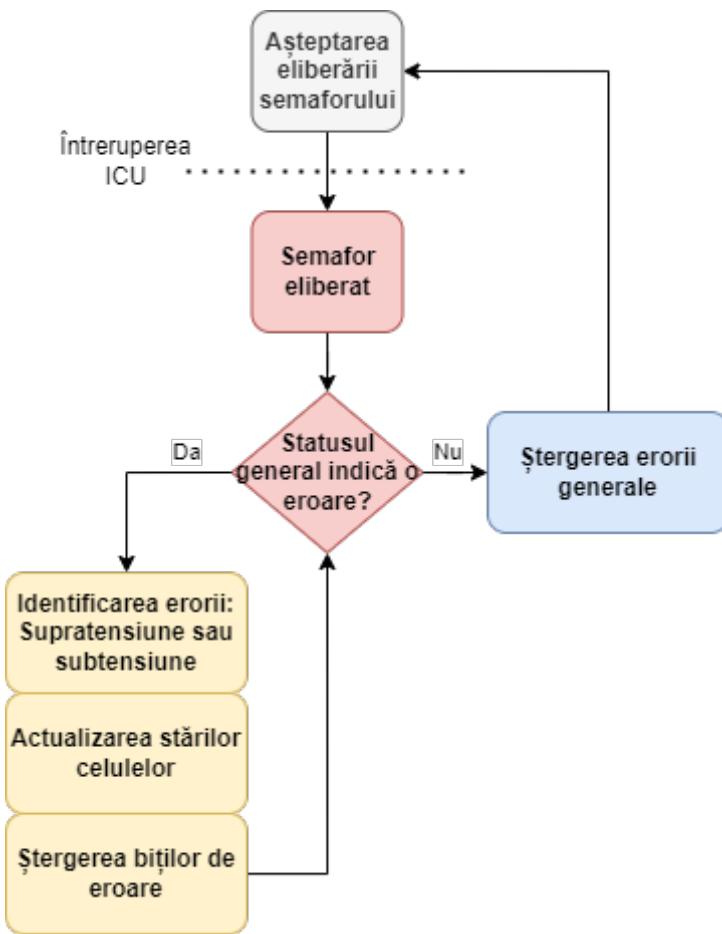


Figura 5.22: Execuția sarcinii LVBMS\_FaultHandlerTask în timpul unei defectiuni

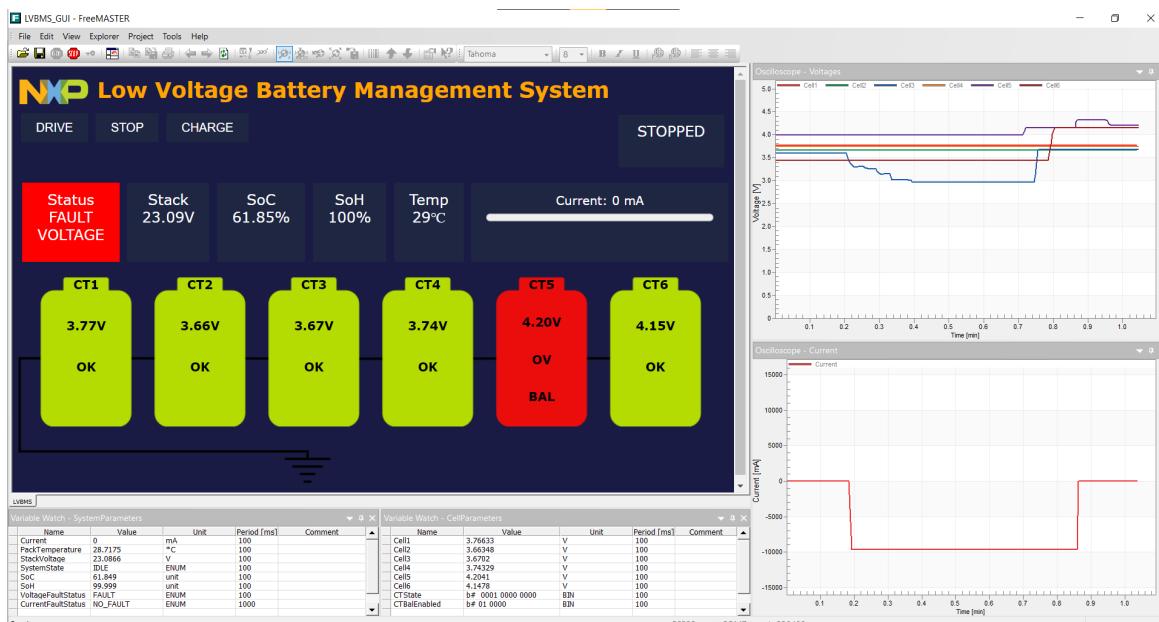


Figura 5.23: Efectul defectiunii detectate în interfața grafică

### 5.2.7 Controlul sistemului

Toate deciziile sistemului de monitorizare sunt luate în interiorul sarcinii de control. Sarcina LVBMS\_ControlTask este executată cel mai des pentru a putea detecta schimbările de stare ale sistemului și lua decizii în cazul defectiunilor. Sarcina este programată să fie executată ciclic la fiecare 2ms și realizează în timpul execuției 3 funcții esențiale: funcția de control care determină declanșarea releelor pentru decuplarea sarcinii în situații critice, funcția de echilibrare a celulelor în timpul încărcării și pe durata de relaxare, și funcția de comunicare cu mediul exterior, atât cu interfața grafică prin intermediul protocolului de comunicație UART și a driverului FreeMASTER, cât și prin protocolul CAN.

Deoarece integratul realizează notificarea erorilor de curent prin intermediul pinului FAULT doar în modul de consum redus de energie, algoritmul de control a integrat verificarea software a currentului în funcție de starea sistemului. Verificarea currentului presupune detectia unui curent de încărcare sau descărcare prea mare. Pentru bateria modelată, curentul de descărcare maxim este 15A, iar cel de încărcare este 4A (Tabelul 5.1).

Pe lângă verificarea asupra curentului, sarcina verifică și starea de încărcare a bateriei. Această verificare împiedică descărcarea bateriei sub pragul de 5%, la fel și încărcarea peste 100%. În oricare dintre aceste cazuri bateria este decuplată de la sarcină, iar BMS schimbă starea bateriei în stare de repaus.

Pentru lucrarea de față, BMS decupla bateria în cazul subtensiunilor, supratensiunilor, supracurrentului sau stărilor de încărcare necorespunzătoare care, netratate, ar cauza erori în viitor. Cuplarea bateriei nu va fi permisă, chiar dacă această decizie vine din partea utilizatorului prin intermediul interfeței grafice.

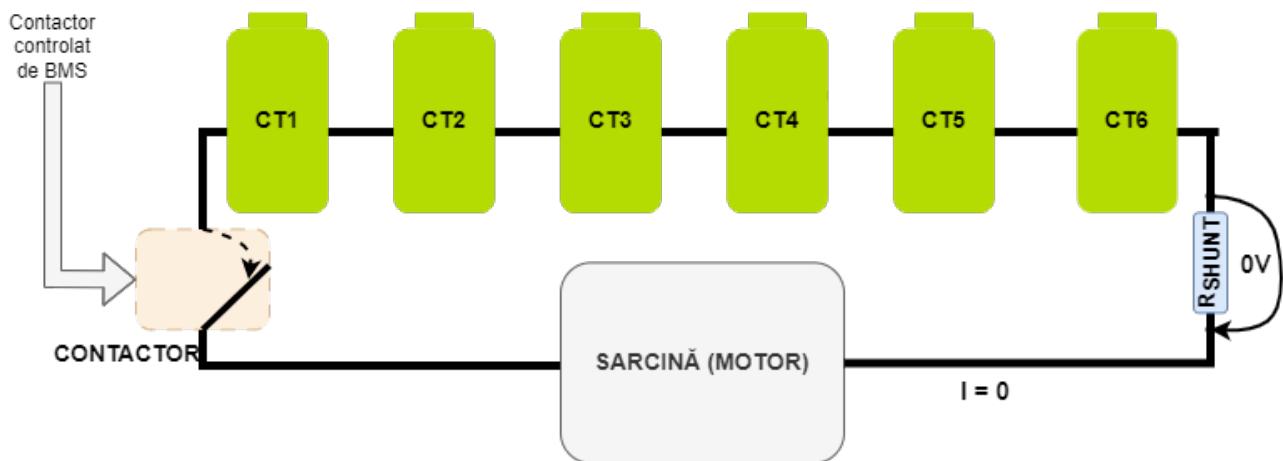


Figura 5.24: Decuplarea bateriei comandată de BMS

### 5.2.8 Echilibrarea celulelor

Pe lângă verificarea curentului și a controlului asupra stării bateriei și cel al contactorului, sarcina LVBMS\_ControlTask se ocupă și de echilibrarea celulelor. MC33772C poate balansa pasiv celulele conectate, având control individual asupra celor 6 canale de echilibrare.

Pentru a nu afecta performanțele bateriei, echilibrarea nu este activată pe durata descărcării. În timpul încărcării și a repausului, folosind tensiunile măsurate de sarcina LVBMS\_MeasureTask, scopul algoritmului de echilibrare este acela de a păstra tensiunile celulelor suficient de apropiate pentru maximiza energia ce poate fi eliberată de baterie. Pentru o baterie reală, un BMS nu va tolera o diferență de tensiune mai mare decât 150mV între oricare două celule. Deoarece în lucrarea de față se lucrează cu un emulator de baterii, acest prag a fost crescut artificial la 0,8V pentru a putea demonstra algoritmul de echilibrare cu ajutorul potențiometrelor prezente pe BATT-6EMULATOR.

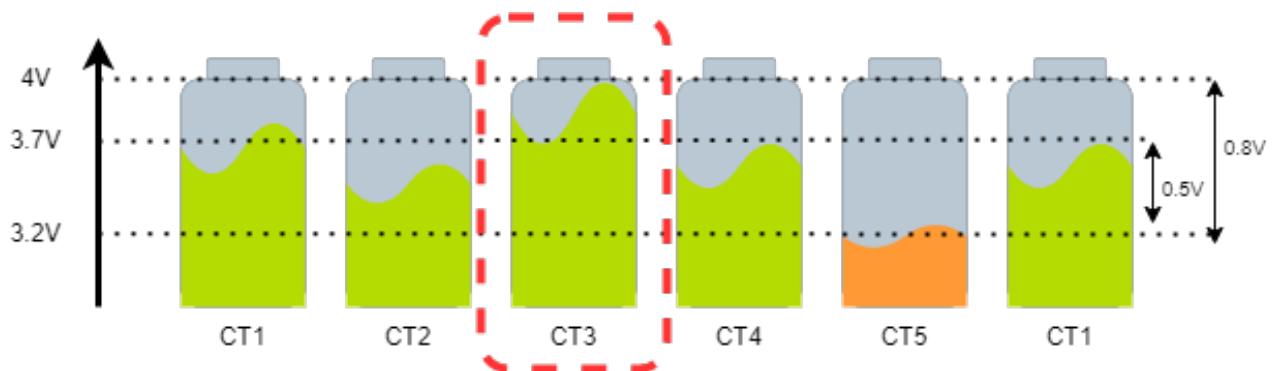


Figura 5.25: Principiul de funcționare al algoritmului de echilibrare al celulelor

În figura 5.25 se evidențiază modul de declanșare a balansării pasive. Presupunem celula CT5 celula cu nivelul de tensiune cel mai redus. Celula CT3 este singura care nu respectă cerințele de funcționare, deoarece tensiunea acesteia este mai mare cu 0,8V decât tensiunea celulei CT5. BMS va porni canalul de echilibrare pentru CT3.

Algoritmul de echilibrare iterează prin valorile tensiunilor și identifică celula cea mai descărcată. Restul tensiunilor sunt comparate cu tensiunea cea mai scăzută pentru a determina dacă pragul de 0,8V a fost atins, caz în care se va selecta celula în cauză pentru echilibrare.

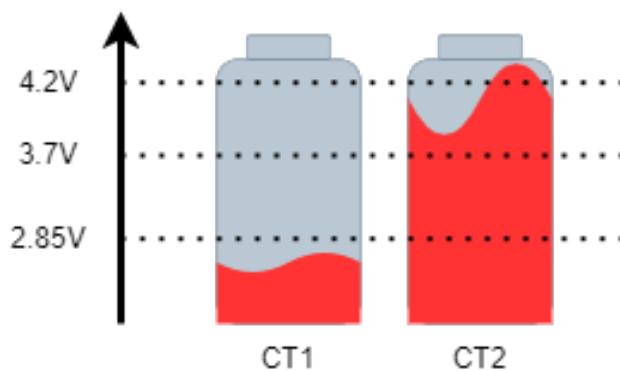


Figura 5.26: Principiul de echilibrare pentru celulele avariante

Există două cazuri speciale pe care algoritmul de echilibrare trebuie să le ia în considerare (Figura 5.26). Aceste cazuri implică depășirea limitelor recomandate ale tensiunilor, acestea fiind 2,85V limita inferioară și 4,2V limita superioară pentru acumulatorul SAMSUNG 30Q INR18650. Dacă o celulă depășește limita impusă de 4,2V, echilibrarea pentru această celulă va fi pornită indiferent dacă tensiunea acesteia este mai mare cu 0,8V față de nivelul celulei celei mai descărcate. Acest exemplu poate fi observat în figura 5.23 pentru celula CT5. Pentru celulele cu tensiuni mai mici decât 2,85V nu se va efectua echilibrarea, deoarece descărcarea sub acest nivel poate avaria acumulatorul. Acest comportament se poate observa în figura 5.27 pentru celula CT4.

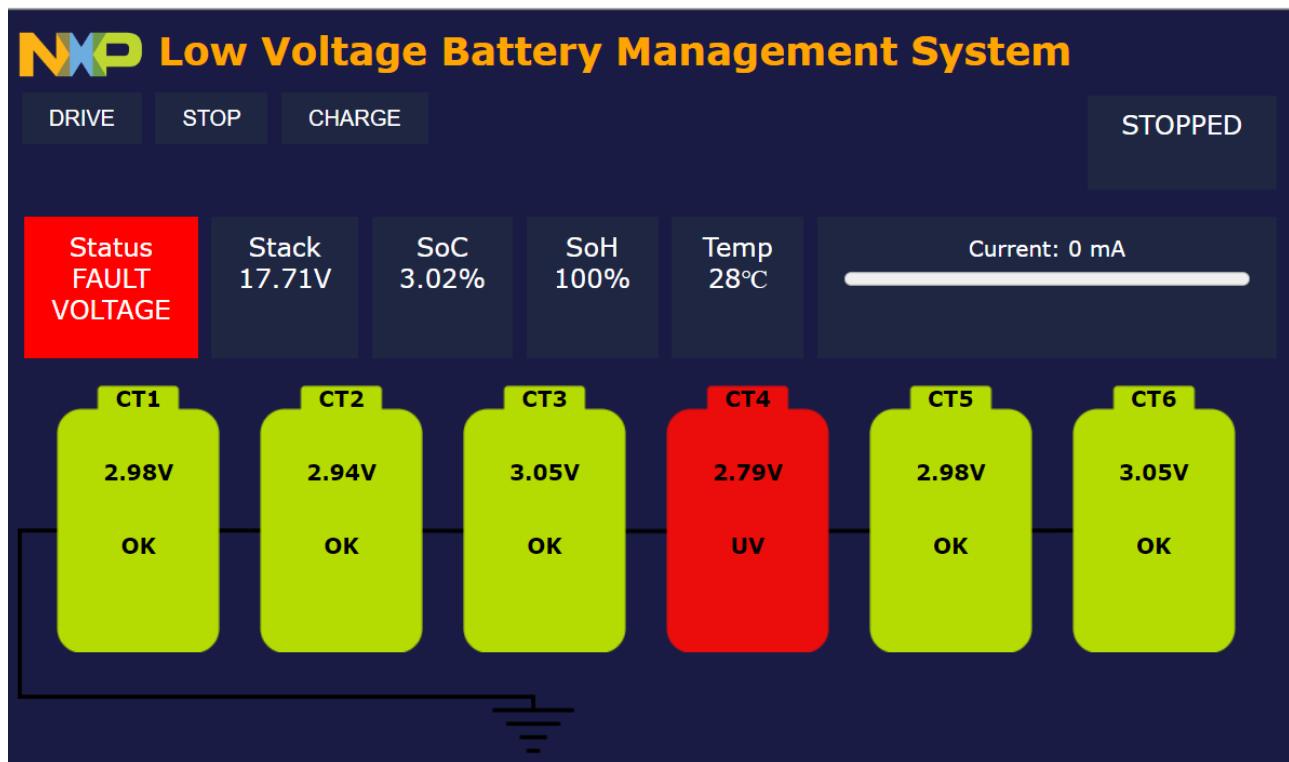


Figura 5.27: Comportamentul de echilibrare unei celule prea descărcate

## Capitolul 6

### Contribuții personale

Prin implementarea componentelor software prezentate în această lucrare am contribuit la dezvoltarea portofoliului BMS oferit de compania NXP Semiconductors. Implicarea constă în realizarea designului, implementarea și testarea modulelor software folosite pentru sistemele dedicate aplicațiilor ce folosesc tensiuni joase.

Printre contribuțile propriei asupra acestui pachet software se numără:

- analiza dispozitivelor MC33772C (TPL2) și MC33775A (TPL3) și documentarea comportamentului acestora în varianta de comunicație prin interfața SPI.
- semnalarea eventualelor diferențe între comportamentul real și comportamentul descris în versiunile initiale ale foilor de catalog.
- analiza arhitecturii BMS și a driverelor de împachetare existente și realizarea strategiei de împachetare a mesajelor pentru varianta SPI în funcție de protocolul TPL al dispozitivului și comanda mesajului (scriere, citire, NOP).
- realizarea designului componentei software Bms\_SpiIf bazat pe arhitectura BMS existentă, cerințele initiale de funcționare și propunerile proprii (transmiterea simultană a 10 mesaje, separarea funcționalităților TPL2 și TPL3 prin directive de preprocesor pentru reducerea amprentei de memorie).
- implementarea funcțională a driverului Bms\_SpiIf, cu suport software pentru ambele protocoale TPL.
- implementarea interfețelor grafice pentru configurarea componentei Bms\_SpiIf, atât pentru mediul S32DS, cât și pentru configuratorul EB Tresos pentru module AUTOSAR.
- realizarea verificărilor automate pentru evitarea configurației incorecte a componentei de către utilizator.
- generarea automată de cod bazată pe configurațiile selectate din S32DS sau EB Tresos folosind sintaxele specifice celor două medii.
- realizarea sistemului hardware configurabil folosit pentru testarea comunicatiei SPI folosind driverul Bms\_SpiIf pentru diferite combinații de dispozitive BCC.
- realizarea testelor funcționale pentru verificarea funcțională a driverul Bms\_SpiIf și detectarea erorilor în timpul dezvoltării.
- implicarea în dezvoltarea testelor de performanță pentru driverul Bms\_SpiIf de unde a rezultat o încărcare a procesorului de numai 6%, număr ce reflectă atât procesarea descriptorilor de tranzacție, cât și împachetarea mesajelor de către componentele software de control al BCC-urilor.

- realizarea strategiei de implementare a aplicației LVBMS care folosește circuitul integrat MC33772C și comunicația SPI.
- implementarea aplicației LVBMS folosind pachetul BMS SDK versiunea 1.0.0 și sistemul de operare FreeRTOS.
- dezvoltarea interfeței grafice și a logicii de comunicație a aplicației LVBMS folosind mediul FreeMASTER.
- testarea aplicației LVBMS cu ajutorul emulatorului BATT6-EMULATOR folosit în diferite scenarii.

Punctele menționate anterior au fost precizate în ordine cronologică pentru a putea urmări evoluția proiectului în timp.

## Concluzii

Partea practică a acestei lucrări a făcut posibilă folosirea soluțiilor dezvoltate de NXP Semiconductors în aplicațiile ce lucrează cu tensiuni joase. Prin adăugarea driverului Bms\_SpiIf a fost extins pachetul BMS SDK care până la versiunea 1.0.0 oferea suport software doar pentru aplicații de înaltă tensiune, cum ar fi vehiculele electrice.

Datorită acestei contribuții, companiile care activează în domenii precum micromobilitate, automotive, robotică, aparate medicale, unde sunt folosite baterii Li-Ion de joase tensiuni , vor putea lua în considerare folosirea dispozitivelor oferite de NXP Semiconductors, ajutând astfel la dezvoltarea companiei, dar și a domeniilor menționate anterior.

Prin dezvoltarea aplicației LVBMS, companiile interesate vor avea o referință software care pune în evidență toate abilitățile integratului MC33772C. Referința software este de mare utilitate pentru companiile interesate deoarece ajută la evaluarea produsului demonstrat, dar și la reducerea timpului de dezvoltare prin reutilizarea pasajelor de cod. Timpul petrecut pentru evaluarea produsului este de asemenea redus datorită interfeței grafice dezvoltate care permite utilizatorilor înțelegerea funcționării pe cale grafică înainte de evaluarea software.

## Îmbunătățiri

Tema inițială și-a propus utilizarea protocolului Ethernet pentru transmisia datelor către aplicația de diagnoză. S-a renunțat la această cerință, deoarece placa de dezvoltare folosită nu integrează și un transciever Ethernet, fiind necesară transmiterea datelor prin altă metodă. Rata de bit a protocolului UART este semnificativ mai mică decât cea a protocolului Ethernet, limitând astfel transferul de date. Folosirea acestui protocol și a unei aplicații grafice mai rapide va îmbunătăți experiența utilizatorului.

Driverul Bms\_SpiIf ar putea fi îmbunătățit prin adăugarea unei noi funcționalități care permite salvarea mai multor descriptori de tranzacție într-o coadă software. Această funcționalitate este utilă deoarece sarcinile pot trimite acești descriptori chiar dacă driverul este ocupat cu procesarea unui alt descriptor. Astfel, sarcinile care doresc inițierea comunicației cu dispozitivele BCC pot trimite mesajele fără a fi nevoie să aștepte până când driverul a finalizat procesarea TD-ului anterior.

Driverul Bms\_SpiIf oferă performanțe ridicate, ocupând doar 6% din puterea totală de procesare a microcontrolerului. Această metrică ar putea fi totuși îmbunătățită prin folosirea modului DMA (Direct Memory Access), salvând astfel timpul de procesare necesar pentru a muta datele din memoria RAM a microcontrolerului către perifericul SPI, și invers.

## Dezvoltări pentru viitor

Cu ajutorul tehnologiilor actuale, se dorește tot mai mult interconectarea tuturor dispozitivelor cu ajutorul sistemelor centralizate. Această rețea de dispozitive a ajuns să fie cunoscută sub numele de Internet of Things (IoT), fiind adoptată de tot mai multe companii pentru a permite procesarea și analiza în timp real a datelor cât mai aproape de sursa acestora.[16]

Pentru a facilita colectarea datelor, analiza și controlul în timp real al sistemului, dezvoltarea continuă a algoritmilor folosiți pentru estimarea cât mai precisă a stării bateriei, dar și pentru dezvoltarea unor metode de prevenție a pericolelor, tehnologiile BMS pot fi integrate într-o rețea centralizată.

Tranziția tehnologiei BMS clasice la tehnologia IoT se poate realiza dezvoltând un sistem cu rolul de gateway între BMS și serverele în care sunt stocate datele. Această dezvoltare presupune accesarea datelor prin intermediul tehnologiilor Cloud și protejarea acestora pentru a preveni accesul neautorizat. Aceste cerințe pot fi implementate folosind procese securizate precum autentificarea cu mai mulți factori, restricționarea accesului bazat pe permisiunile utilizatorului și politici stricte cu privire la parolele utilizate și actualizarea periodică a acestora.

O arhitectură posibilă presupune utilizarea unui microcontroler din familia S32K3 pentru modulul BMS dezvoltat în această lucrare, și utilizarea unui microcontroler din familia S32G care va realiza conexiunea cu rețeaua centralizată și va realiza funcția de poartă de acces între BMS și Cloud. Cele două sisteme pot comunica prin CAN pentru a utiliza procesul de comunicație dezvoltat în aplicația LVBMS prezentată în această lucrare.

## Bibliografie

- [1] McKinsey Center for Future Mobility. Battery demand is growing—and so is the need for better solutions along the value chain. <https://www.mckinsey.com/industries/automotive-and-assembly/our-insights/battery-2030-resilient-sustainable-and-circular>. Accessed: 2023-06-09.
- [2] *Handbook on battery energy storage system*. Asian Development Bank, 2018.
- [3] Lithium-Ion Battery Advantages and Disadvantages. [https://www.electronics-notes.com/articles/electronic\\_components/battery-technology/li-ion-lithium-ion-advantages-disadvantages.php](https://www.electronics-notes.com/articles/electronic_components/battery-technology/li-ion-lithium-ion-advantages-disadvantages.php). Accessed: 2023-04-18.
- [4] NXP Semiconductors. <https://www.nxp.com/>. Accessed: 2023-06-09.
- [5] INRIX. Global Traffic Scorecard - 2022. <https://inrix.com/scorecard/>. Accessed: 2023-06-09.
- [6] McKinsey Center for Future Mobility. Mobility split by mode of transportation, worldwide - 2022. <https://www.mckinsey.com/industries/automotive-and-assembly/our-insights/the-future-of-mobility-mobility-evolves>. Accessed: 2023-06-09.
- [7] Paweł Głogowski. Battery Management System. <https://solidstudio.io/blog/battery-management-system-bms>. Accessed: 2023-04-18.
- [8] An Explanation of the Beta and Steinhart-Hart Equations for Representing the Resistance vs. Temperature Relationship in NTC Thermistor Materials. <https://www.qtisensing.com/wp-content/uploads/Beta-vs-Steinhart-Hart.pdf>. Accessed: 2023-06-09.
- [9] Andrey Solovev. BMS Safety and Security Solutions to Avoid Battery Hazards. <https://hackernoon.com/bms-safety-and-security-solutions-to-avoid-battery-hazards>. Accessed: 2023-04-18.
- [10] Synopsys. Thermal Management Protection. <https://www.synopsys.com/glossary/what-is-a-battery-management-system.html#b>. Accessed: 2023-04-19.
- [11] Bruce Feng. Design of Lithium-Ion Battery Charging And Discharging Theory And Electricity Calculation Method. <https://www.linkedin.com/pulse/design-lithium-ion-battery-charging-discharging-theory-bruce-feng>. Accessed: 2023-04-02.
- [12] Martin Murnane and Adel Ghazel. A closer look at State of Charge (SOC) and State of Health (SOH) estimation techniques for batteries. <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/tech-articles/a-closer-look-at-state-of-charge-and-state-health-estimation-tech.pdf>. Accessed: 2023-03-15.
- [13] Neil Samaddar et al 2020 J. Phys.: Conf. Ser. 1716 012005. Passive Cell Balancing of Li-Ion batteries used for Automotive Applications. Accessed: 2023-06-09.

- [14] FreeRTOS. <https://www.freertos.org/about-RTOS.html>. Accessed: 2023-04-20.
- [15] Lagrat Ismail Fadlaoui Elmahdi and Masaif Noureddine. Fitting the OCV-SOC relationship of a battery Lithium-Ion using genetic algorithm method. [https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/pdf/2021/10/e3sconf\\_icies2020\\_00097.pdf](https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/pdf/2021/10/e3sconf_icies2020_00097.pdf). Accessed: 2023-03-15.
- [16] Adam Simmons. Cloud Computing for the Internet of Things. <https://dgtlinfra.com/cloud-internet-of-things-iot/>. Accessed: 2023-06-25.