



UNIVERSITATEA NAȚIONALĂ DE
ȘTIINȚĂ ȘI TEHNOLOGIE
POLITEHNICA BUCUREȘTI



Școala Doctorală de Electronică, Telecomunicații
și Tehnologia Informației

REZUMAT TEZĂ DE DOCTORAT

Ionuț-Constantin GURAN

CONTRIBUȚII ÎN MANAGEMENTUL BATERIILOR
DIN DOMENIUL AUTO

CONTRIBUTIONS IN AUTOMOTIVE BATTERY
MANAGEMENT

COMISIA DE SUSȚINERE PUBLICĂ

Prof. Dr. Ing. Ion MARGHESCU

Universitatea Națională de Știință și Tehnologie Politehnica București

Președinte

Prof. Dr. Ing. Adriana FLORESCU

Universitatea Națională de Știință și Tehnologie Politehnica București

Coordonator

Prof. Dr. Ing. Dan Alexandru STOICHESCU

Universitatea Națională de Știință și Tehnologie Politehnica București

Referent

Prof. Dr. Ing. Radu GABRIEL BOZOMITU

Universitatea Tehnică „Gheorghe Asachi” din Iași

Referent

Conf. Dr. Ing. Alin DĂNIȘOR

Universitatea Maritimă din Constanța

Referent

BUCUREȘTI 2025

Cuprins

1. Introducere	1
1.1. Prezentarea domeniului tezei de doctorat	1
1.2. Scopul tezei de doctorat	2
1.3. Conținutul tezei de doctorat	2
2. Stadiul actual al cercetării în domeniu	3
2.1. Cercetările despre proiectarea unui sistem de management al bateriilor.....	3
2.2. Cercetările despre tehnicile de echilibrare a celulelor	3
2.3. Concluziile capitolului 2	4
3. Modelul de Simulare al unei Celule LiFePO ₄	5
3.1. Importanța modelului pentru celula LiFePO ₄	5
3.2. Implementarea modelului pentru celula LiFePO ₄	5
3.3. Testarea modelului celulei LiFePO ₄	6
3.4. Concluziile capitolului 3	6
4. Abordare inovatoare pentru modelare rezistenței în conducție a tranzistoarelor MOS de putere.....	7
4.1. Context	7
4.2. Modelul tranzistorului CSD13380F3 dezvoltat de Texas Instruments	7
4.3. Metodologia pentru noul model de tranzistor MOS CSD13380F3	8
4.4. Rezultatele simulării pentru noul model propus al tranzistorului MOS CSD13380F3	8
4.5. Discuție și comparație	9
4.6. Concluziile capitolului 4	9
5. Simularea reguletoarelor de tensiune LDO din domeniul auto: O abordare nouă pentru modelarea PSRR.....	10
5.1. Motivație	10
5.2. Fundamente PSRR	10
5.3. Dezvoltarea și implementarea noului model de PSRR: Materiale și metode .	11
5.4. Simularea noului model de PSRR	11
5.5. Analiza și compararea rezultatelor teoretice și simulate ale PSRR	12

5.6. Concluziile capitolului 5	12
6. Modelarea Circuitelor Interne ale unui BMS	13
6.1. Modelarea unui numărător digital crescător pentru BMS.....	13
6.2. Funcționalitate îmbunătățită de numărare descrescătoare în SPICE	14
6.3. Generarea semnalelor de ceas în SPICE	15
6.4. Metodologie SPICE îmbunătățită de control al slew rate pentru modele de LDO-uri din domeniul auto.....	16
6.5. O tehnică inovatoare pentru măsurarea frecvenței în simulatoarele SPICE ...	18
6.6. Concluziile capitolului 6	19
7. Modelarea și Simularea SPICE a unui BMS Pasiv pentru Vehicule Electrice	20
7.1. Modelarea circuitelor interne ale BMS-ului	20
7.2. Modelul complet de BMS	22
7.3. Concluziile capitolului 7	22
8. Proiectarea și Integrarea Fizică a unui BMS Pasiv cu Capabilitate de Monitorizare la Distanță pentru Platforme Auto	23
8.1. Proiectarea BMS-ului	23
8.2. Asamblarea PCB-urilor, integrarea și testarea BMS-ului propus	25
8.3. Rezultate și analiză comparativă	25
8.4. Concluziile capitolului 8	25
9. Concluzii	26
9.1. Rezultate obținute	26
9.2. Contribuții originale	27
9.3. Lista lucrărilor originale	29
9.4. Perspective de dezvoltare ulterioară	30
Bibliografie	31

Capitolul 1

Introducere

Pe măsură ce industria utilizează din ce în ce mai des energia mai verde, bateriile au început să joace un rol foarte important în sistemele moderne de stocare a energiei și în domeniul auto. O provocare mare este dată de diferența în starea de încărcare a celulelor individuale, ceea ce reduce durata de viață a bateriei. Sistemele de management al bateriilor (BMS) abordează această problemă prin utilizarea tehnicilor de estimare și echilibrare a stării de încărcare (parametrul SOC) pentru a asigura funcționarea corectă a celulelor. De asemenea, BMS acționează pentru a preveni deteriorarea celulelor atunci când acestea nu sunt folosite corespunzător. În industria electronică, inginerii folosesc simularea, în special SPICE (Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis), pentru a dezvolta și valida circuitele într-un ritm mai rapid, asigurând o performanță optimă înainte de implementarea fizică.

1.1 Prezentarea domeniului tezei de doctorat

Bateriile cu FeroFosfat de Litiu (LiFePO_4) au devenit o alegere optimă pentru industria auto datorită ratei lor scăzute de auto-descărcare, densității energetice mari, eficienței, duratei de viață mai lungi și siguranței îmbunătățite. În ciuda acestor avantaje, capacitatea lor scade în timp, necesitând înlocuirea când aceasta ajunge sub 80% din capacitatea nominală.

Monitorizarea continuă a parametrilor SOH (state of Health) și SOC (State of Charge) este esențială pentru asigurarea funcționării optime a celulelor. BMS-urile ajută la scăderea ritmului de degradare a celulelor prin monitorizarea parametrilor acestora și inițierea echilibrării celulelor atunci când este necesar. Simularea SPICE este importantă pentru proiectarea și verificarea acestor sisteme de management al bateriilor, permițând identificarea timpurie a problemelor și dezvoltarea eficientă în ceea ce privește costurile.

Această teză de doctorat are ca scop crearea unui model SPICE complet pentru un BMS pasiv pentru prima dată în literatura din domeniu, împreună cu proiectarea unui BMS pasiv care are performanțe superioare în comparație cu alte circuite similare propuse până în prezent. Capitolul 1 prezintă domeniul tezei de doctorat, scopul tezei de doctorat și conținutul acesteia. Teza de doctorat propusă tratează domeniul celulelor LiFePO_4 și al sistemelor de management al bateriilor, incluzând proiectarea, simularea SPICE, implementarea și verificarea unor astfel de circuite.

1.2 Scopul tezei de doctorat

BMS-urile prezintă un interes ridicat în literatura recentă din domeniu, având ca scop creșterea eficienței sistemelor alimentate cu baterii prin utilizarea tehnicilor de echilibrare a celulelor.

Echilibrarea pasivă a celulelor disipă energia în exces din celulele mai încărcate, în timp ce echilibrarea activă transferă energia între celule pentru a ajunge la același SOC. Echilibrarea pasivă este preferată pentru simplitate, cost redus și ușurința în implementare.

BMS-urile moderne se bazează și pe monitorizarea la distanță pentru informații în timp real despre starea bateriei, dar această funcționalitate nu este studiată suficient în literatura de specialitate. În plus, deși proiectarea fizică și verificarea BMS-urilor sunt bine studiate, nu au fost identificate modele SPICE complete de simulare.

Această teză de doctorat își propune să dezvolte un model SPICE complet pentru BMS-urile care monitorizează celule LiFePO₄ și să implementeze fizic un BMS pasiv cu echilibrare rapidă și monitorizare la distanță, adaptat pentru industria auto.

1.3 Conținutul tezei de doctorat

Conținutul acestei teze de doctorat este structurat în 9 capitole astfel:

- **Capitolul 1** prezintă domeniul, scopul și conținutul tezei de doctorat.
- **Capitolul 2** sintetizează cercetările existente despre BMS-uri.
- **Capitolul 3** detaliază dezvoltarea unui model SPICE de simulare pentru celulele LiFePO₄.
- **Capitolul 4** introduce o metodologie inovatoare pentru modelarea $R_{DS(on)}$ (ON-state Drain-Source resistance) a tranzistoarelor MOS (Metal-Oxide-Semiconductor) de putere.
- **Capitolul 5** propune o abordare nouă pentru modelarea PSRR (Power Supply Rejection Ratio) a reglatoarelor LDO (Low Drop Out) din domeniul auto.
- **Capitolul 6** propune modele SPICE pentru circuitele digitale utilizate în BMS.
- **Capitolul 7** dezvoltă un model SPICE complet pentru un BMS care echilibrează patru celule LiFePO₄, având următoarele subcircuite: monitorizarea tensiunilor celulelor, echilibrarea celulelor, monitorizarea curentului, circuitul de alimentare și microcontrolerul emulat.
- **Capitolul 8** acoperă dezvoltarea hardware și integrarea unui BMS pasiv cu monitorizare la distanță pentru domeniul auto, având performanțe superioare comparativ cu alte sisteme similare.
- **Capitolul 9** prezintă rezultatele obținute, contribuțiile originale, precum și perspectivele de dezvoltare ulterioară.

Capitolul 2

Stadiul actual al cercetării în domeniu

Acest capitol prezintă stadiul actual al cercetării în domeniul BMS pentru a identifica oportunitățile de inovație.

2.1 Cercetările despre proiectarea unui sistem de management al bateriilor

În 2021, Wu et al. au introdus un BMS pentru vehicule electrice, folosind sistemul de monitorizare LTC6811 și microcontrolerul NuMicro M487, fără sa-l simuleze [14].

În 2022, Liu et al. [15] au dezvoltat un BMS pentru EMU (Electronic Management Unit) în sisteme de stocare cu o arhitectură de tip master-slave, validată doar pentru estimarea parametrului SOC în Matlab.

BMS-ul lui Prakasha et al. [16] din 2022 pentru vehicule electrice a prezentat o configurație de tip master-slave cu Raspberry Pi și Arduino, folosind o sarcină de curent constant pentru echilibrarea celulelor, dar i-a lipsit partea de simulare. În mod similar, Ding et al. [17] au propus un BMS cu echilibrare activă utilizând un convertor flyback de tip Curent Continuu – Curent Alternativ (CC-CA), de asemenea fără simulare.

Rehman et al. [18] au prezentat un BMS bazat pe Internet of Things (IoT) pentru vehicule electrice, concentrându-se pe partea de monitorizare, dar fără echilibrarea celulelor și simulare. Gullu et al. [19] au proiectat un BMS de înaltă tensiune pentru sisteme fotovoltaice, validând doar un convertor Curent Continuu – Curent Continuu (CC-CC) prin simulări.

În cele din urmă, în 2021, Guran et al. [20] au introdus un BMS pentru domeniul auto cu unele componente validate în LTSpice, dar un model complet a fost sugerat pentru lucrări viitoare.

2.2 Cercetările despre tehnicile de echilibrare a celulelor

Pattnaik et al. (2023) [11] au dezvoltat un BMS care alertează utilizatorii asupra defecțiunilor celulelor și echilibrează SOC-ul acestora în timpul încărcării. Ei au simulat tehnici de echilibrare pasivă și activă, observând că echilibrarea activă este mai rapidă și mai eficientă comparativ cu echilibrarea pasivă, care este mai simplă și mai ieftin de implementat.

Nath și Rajpathak (2022) [21] au comparat tehnicile de echilibrare pasivă și activă în BMS-urile pentru vehicule electrice, constatând că echilibrarea pasivă este mai simplă, dar mai puțin eficientă, în timp ce echilibrarea activă reduce pierderile, dar este mai complexă și mai scump de implementat. Kumar et al. (2022) [22] au realizat o comparație teoretică a metodelor de echilibrare pasivă și activă, subliniind compromisurile care trebuie făcute între cost, eficiență și complexitate atunci când se alege o anumită tehnică de egalizare. Ei au concluzionat că nicio metodă nu este optimă pentru toate aplicațiile, necesitând o analiză atentă a cerințelor specifice.

Karmakar et al. (2023) [23] au proiectat un BMS folosind un controller PID (Proportional-Integral-Derivative) cu echilibrare pasivă, având o precizie îmbunătățită și timp de echilibrare redus, dar nu au explorat partea de monitorizare la distanță. Dalvi și Thale (2020) [24] au prezentat un BMS controlat de către un DSP (Digital Signal Processor) cu echilibrare pasivă pentru vehicule electrice și vehicule hibride. Ei au menționat posibilitatea de a îmbunătăți performanța BMS-ului cu funcții de monitorizare la distanță.

2.3 Concluziile capitolului 2

Stadiul actual al cercetării în domeniu detaliat în secțiunile 2.1 și 2.2, *publicat de asemenea și în articolele de cercetare ale autorului [26] și [27]*, subliniază câteva puncte cheie, care pot fi consultate mai jos.

Secțiunea 2.1 se axează pe cercetările despre proiectarea fizică a BMS-urilor, evidențiind faptul că dezvoltarea unui model SPICE cu funcționalitate completă pentru BMS-uri nu a fost realizată până în momentul de față. Un astfel de model este important pentru implementarea fizică a unui BMS, reducând timpul și costurile de dezvoltare și asigurând produse finale fără defecte.

Secțiunea 2.2 compară tehnicile de echilibrare activă și pasivă a celulelor. Echilibrarea activă oferă timpi rapizi de egalizare și eficiență ridicată, dar este complexă și costisitoare, în timp ce echilibrarea pasivă este mai simplă, mai compactă și mai rentabilă, în ciuda eficienței mai scăzute și proceselor mai lente. Conform cercetărilor din domeniu, egalizarea pasivă este mai benefică pentru vehiculele electrice și hibride. În plus, monitorizarea la distanță a parametrilor bateriei este un aspect important, dar nestudiat îndeajuns în BMS-urile moderne.

Capitolul 3

Modelul de Simulare al unei Celule LiFePO4

3.1 Importanța modelului pentru celula LiFePO4

Bateriile cu litiu, în special cele cu LiFePO4, sunt preferate pentru stocarea energiei datorită densităților lor de putere ridicate și duratei lungi de viață. Bateriile LiFePO4 oferă performanțe electrochimice excelente, rezistență internă scăzută, stabilitate termică bună și caracteristici de siguranță ridicată, ceea ce le face populare în aplicațiile auto precum vehiculele electrice și vehiculele hibride.

Cu toate acestea, performanța lor poate fi afectată de temperaturi extreme. Proiectarea circuitelor alimentate de baterii necesită simularea atât a bateriei, cât și a circuitului. Subcapitolele următoare propun un model SPICE pentru o celulă de baterie LiFePO4 CALB (China Aviation Lithium Battery) CA180FA, urmărind o emulare precisă a comportamentului celulei [30].

3.2 Implementarea modelului pentru celula LiFePO4

Modelul comportamental al celulei este reprezentat grafic în Figura 3.3, care include caracteristica OCV (Open Circuit Voltage) = $f(\text{SOC})$ a celulei LiFePO4, precum și rezistența sa internă.

```
.SUBCKT LIFEPO4_CELL CEL+ CEL- SOC PARAMS:
+ NOMINAL_CAPACITY = 180
+ INTERNAL_RESISTANCE = 0.6m
+ INITIAL_SOC = 1

E_OCV      CELP      CELN      TABLE {V(SOC)} =
+ {0, 2.5}      {0.03, 2.8}      {0.05, 2.9}
+ {0.075, 3}    {0.1, 3.1}          {0.12, 3.17}
+ {0.2, 3.2}    {0.3, 3.23}         {0.4, 3.28}
+ {0.5, 3.29}   {0.6, 3.3}          {0.65, 3.3}
+ {0.7, 3.31}   {0.76, 3.32}        {0.8, 3.33}
+ {0.9, 3.34}   {0.95, 3.35}        {0.97, 3.37}
+ {0.98, 3.38}  {1, 3.5}

V_CSENSE    CELN      CEL-
R_INT       CELP      CEL+      {INTERNAL_RESISTANCE}
R_CONV      CEL+      CEL-      1e12

CCELL_CAPACITY      SOC      0      {3600 * NOMINAL_CAPACITY}
GBAT_CURRENT      0      SOC      VALUE={I(V_CSENSE) * IF(V(SOC) < 0
+& I(V_CSENSE) < 0 ,0,1) * IF(V(SOC) > 1 & I(V_CSENSE) > 0,0,1) }
RSOC            SOC      0      1e12

.IC V(SOC)={INITIAL_SOC}

.ENDS
```

Figura 3.3 Implementarea modelului SPICE al celulei LiFePO4

3.3 Testarea modelului celulei LiFePO4

Caracteristica $OCV = f(SOC)$ a modelului SPICE propus pentru celula LiFePO4, obținută prin simulare, este ilustrată în Figura 3.5.

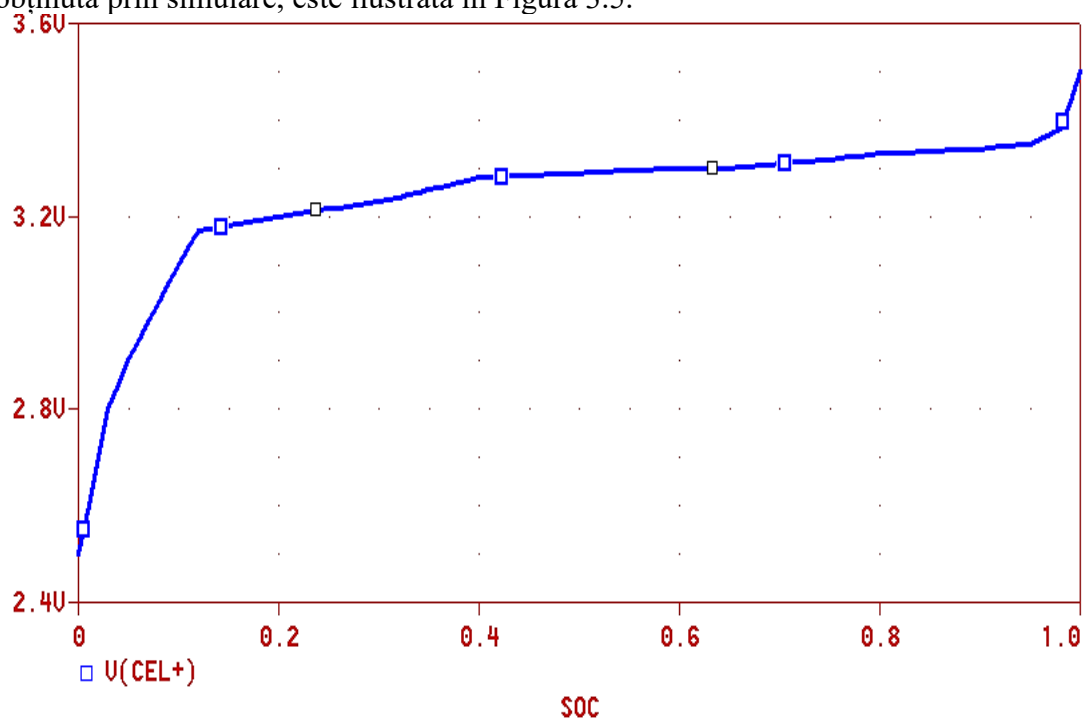


Figura 3.5 Caracteristica $OCV = f(SOC)$ simulată a modelului propus

3.4 Concluziile capitolului 3

Acest capitol, bazat pe unul dintre articolele de cercetare ale autorului [30], prezintă un model SPICE nou pentru o celulă LiFePO4 CALB CA180FA. Acest model, compatibil cu diverse programe de simulare precum OrCAD Capture CIS, Pspice Allegro, TINA, SIMetrix și LTSpice, permite simularea precisă a sistemelor avansate de stocare a energiei, a sistemelor de management al bateriilor și a altor circuite alimentate de baterii. Modelul emulează cu precizie relația $OCV = f(SOC)$ și rezistența internă a celulei LiFePO4, demonstrând o viteză mare de simulare și o convergență foarte bună pentru comportamentul tranzitoriu.

Capitolul 4

Abordare inovatoare pentru modelarea rezistenței în conducție a tranzistoarelor MOS de putere

4.1 Context

Rezistența în conducție $R_{DS_{ON}}$ este un parametru important al MOS-urilor care variază cu temperatura și tensiunea de poartă. Modelele SPICE existente de tranzistoare MOS nu oferă o emulare cu precizie ridicată a parametrului $R_{DS_{ON}}$. Acest capitol propune o metodă inovatoare de modelare a $R_{DS_{ON}}$ pentru tranzistoarele MOS.

4.2 Modelul tranzistorului CSD13380F3 dezvoltat de Texas Instruments

Tranzistorul MOS cu canal N, CSD13380F3, de la Texas Instruments are o valoare scăzută a parametrului $R_{DS_{ON}}$, un curent de drenă ridicat și o capsulă compactă. Texas Instruments oferă, de asemenea, un model SPICE de simulare pentru CSD13380F3.

Figura 4.10 ilustrează caracteristicile $R_{DS_{ON}}$ simulate în funcție de V_{GS} pentru modelul CSD13380F3 de la Texas Instruments.

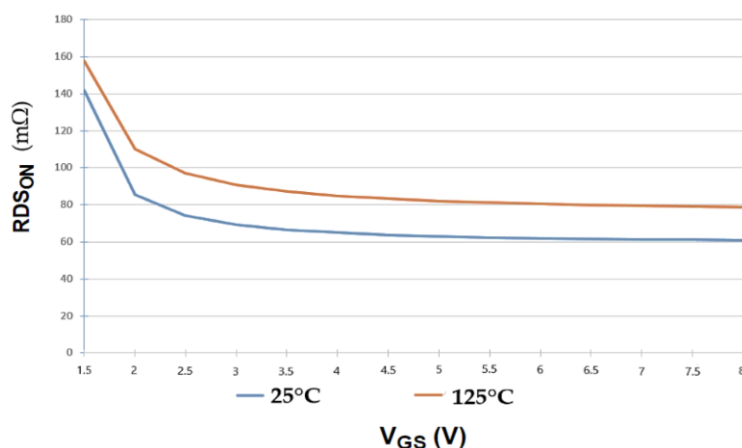


Figura 4.10 $R_{DS_{ON}}$ vs. V_{GS} pentru modelul CSD13380F3 de la Texas Instruments

Figura 4.12 prezintă comportamentul normalizat al $R_{DS_{ON}}$ în funcție de temperatura carcusei T_C pentru modelul de tranzistor CSD13380F3 de la Texas Instruments.

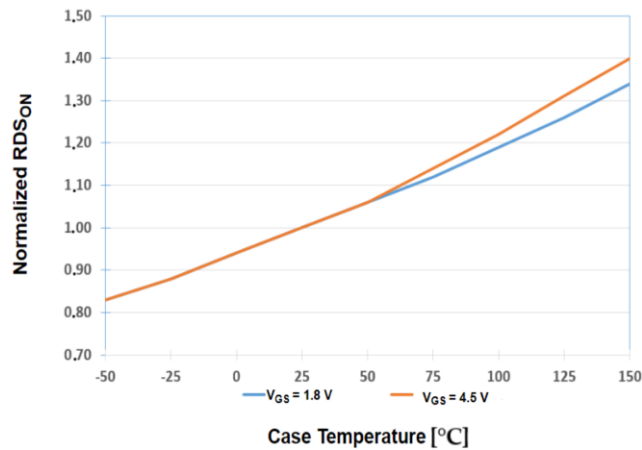


Figura 4.12 $R_{DS_{ON}}$ vs. T_C pentru modelul CSD13380F3 de la Texas Instruments

4.3 Metodologia pentru noul model de tranzistor MOS CSD13380F3

Figura 4.13 ilustrează principiul inovator pentru modelarea rezistenței $R_{DS_{ON}}$. Primul pas este setarea valorii $R_{DS_{ON,t}}$, care reprezintă valoarea teoretică a $R_{DS_{ON}}$, selectată de utilizator pe baza datelor din catalog.

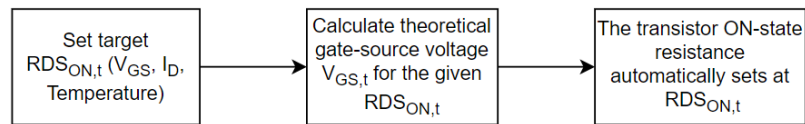


Figura 4.13 Noul principiu de modelare al $R_{DS_{ON}}$

4.4 Rezultatele simulării pentru noul model propus al tranzistorului MOS CSD13380F3

Caracteristica simulată a $R_{DS_{ON}}$ în funcție de V_{GS} pentru noul model CSD13380F3 dezvoltat este ilustrată în Figura 4.17.

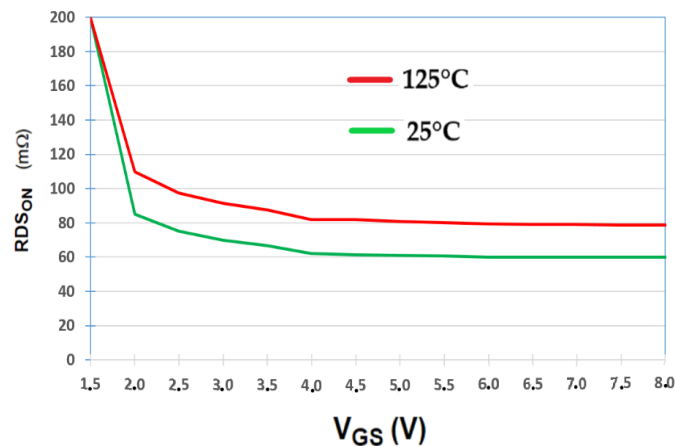


Figura 4.17 Formele de undă $R_{DS_{ON}}$ vs. V_{GS} pentru noul model al CSD13380F3

Graficul din Figura 4.19 ilustrează caracteristica normalizată a $R_{DS_{ON}}$ în funcție de T_C a noului model CSD13380F3 dezvoltat.

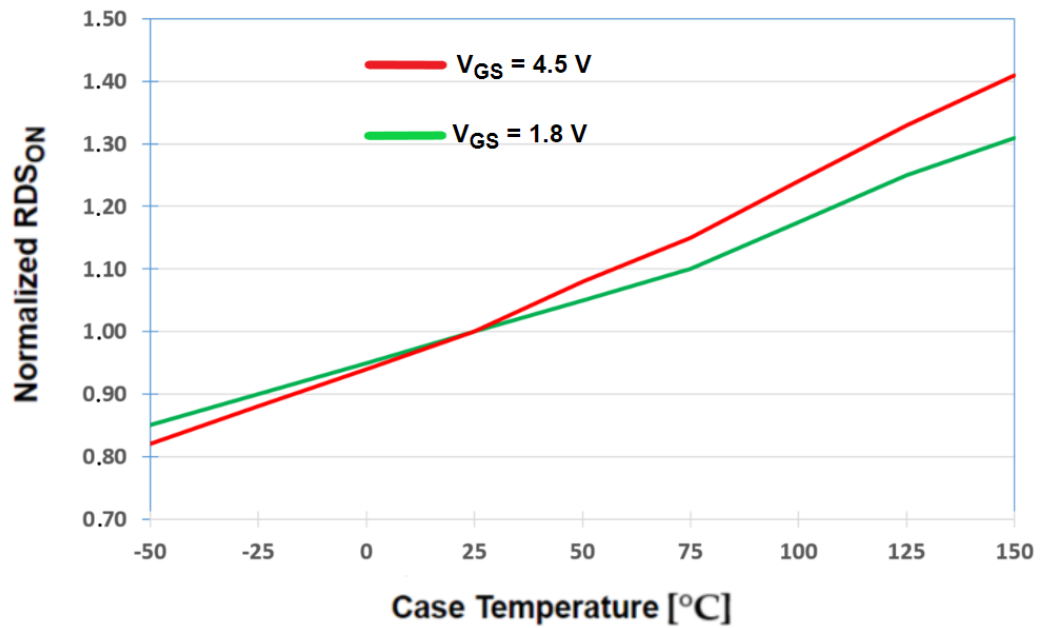


Figura 4.19 Caracteristica normalizată $R_{DS_{ON}}$ vs. T_C pentru noul model CSD13380F3

4.5 Discuție și comparație

Eroarea relativă calculată față de caracteristica teoretică a modelului de la Texas Instruments variază de la 0.08% la 29.12%. În comparație, noul model prezintă o acuratețe semnificativ mai bună, cu o eroare relativă care variază de la 0% la 0.08%, ceea ce demonstrează performanța mai ridicată a noului model comparativ cu modelul proiectat de Texas Instruments.

Eroarea relativă a parametrului $R_{DS_{ON}}$ normalizat pentru modelul de la Texas Instruments variază de la 0% la 2.35%, în timp ce eroarea relativă a parametrului $R_{DS_{ON}}$ normalizat pentru noul model se situează între 0% și 0.8%. Acest fapt demonstrează și mai mult performanța superioară a noului model propus.

4.6 Concluziile capitolului 4

Cercetarea prezentată în acest capitol, care a fost de asemenea prezentată într-unul dintre articolele de cercetare anterioare ale autorului [68], evidențiază o abordare inovatoare în modelarea rezistenței $R_{DS_{ON}}$ pentru tranzistoarele MOS de putere. Tehnica propusă implică ajustarea dinamică a tensiunii poartă-sursă a tranzistorului MOS pentru a atinge o valoare teoretică specifică a $R_{DS_{ON}}$, permițând astfel un control precis asupra acestui parametru.

Capitolul 5

Simularea reguletoarelor de tensiune LDO din domeniul auto: O abordare nouă pentru modelarea PSRR

Simularea este importantă în proiectarea circuitelor destinate domeniului auto atât pentru validare, cât și pentru identificarea defecțiunilor. Acest capitol introduce o tehnică nouă de modelare a PSRR-ului (Power Supply Rejection Ratio) pentru LDO-urile (Low DropOut Voltage Regulator) din domeniul auto, aplicată unui produs de la Texas Instruments și simulată cu PSpice Allegro și OrCAD Capture CIS.

5.1 Motivație

Cercetările existente despre PSRR se concentrează pe proiectarea fizică a LDO-urilor cu un PSRR cât mai scăzut, lipsind însă modelele de simulare precise. Acest capitol abordează această tematică prin propunerea unei abordări inovatoare pentru modelarea precisă a parametrului PSRR aparținând LDO-urilor.

5.2 Fundamente PSRR

În domeniile electronicii de putere și sistemelor auto, PSRR este un parametru cu o importanță majoră. Caracteristica PSRR a unui regulator LDO auto cu PSRR ridicat, TPS785-Q1, este ilustrată în Figura 5.4. Texas Instruments oferă, de asemenea, un model SPICE de simulare pentru TPS785-Q1.

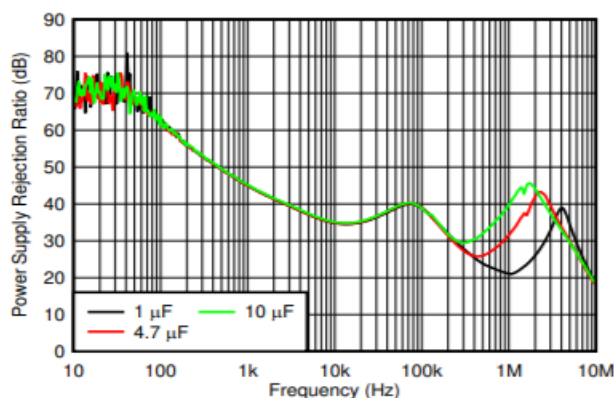


Figura 5.4 Influența C_{OUT} asupra PSRR pentru $V_{OUT} = 3.3\text{ V}$ și $I_{OUT} = 1\text{ A}$

Caracteristicile PSRR simulate ale modelului de LDO TPS785-Q1 furnizat de Texas Instruments, reprezentate în funcție de frecvență și condensatorul de ieșire, sunt prezentate în Figura 5.9.

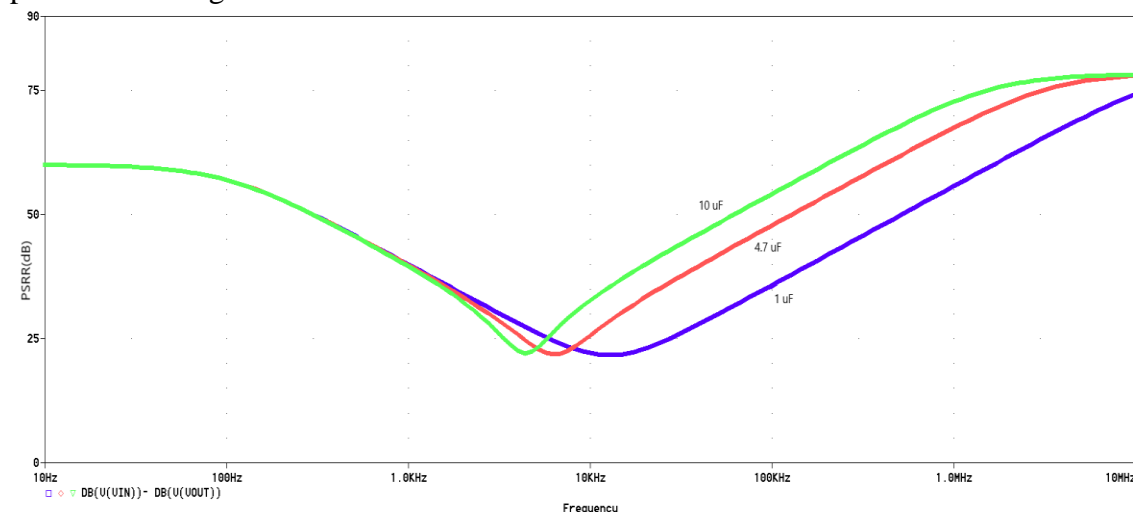


Figura 5.9 Caracteristica PSRR simulată a modelului inițial al TPS785-Q1

5.3 Dezvoltarea și implementarea noului model de PSRR: Materiale și metode

Modelul existent TPS785-Q1 de la Texas Instruments a fost actualizat prin eliminarea caracteristicii PSRR vechi și încorporarea unui nou concept PSRR prezentat în Figura 5.10.

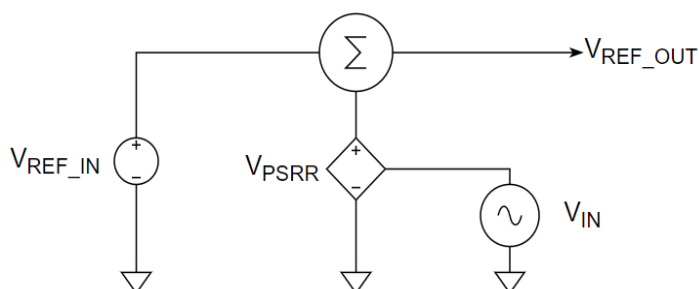


Figura 5.10 Diagrama de concept a noului model de PSRR al LDO-ului

5.4 Simularea noului model de PSRR

Noul PSRR este prezentat în Figura 5.16. Simularea a utilizat doar o valoare de 1 μ F pentru condensatorul de sarcină, deoarece impactul condensatorului asupra PSRR este semnificativ doar peste 300 kHz, în timp ce intervalul de frecvențe mai joase, neafectat de condensator, este mai important. Astfel, nu mai sunt necesare alte valori pentru condensatorul de sarcină.

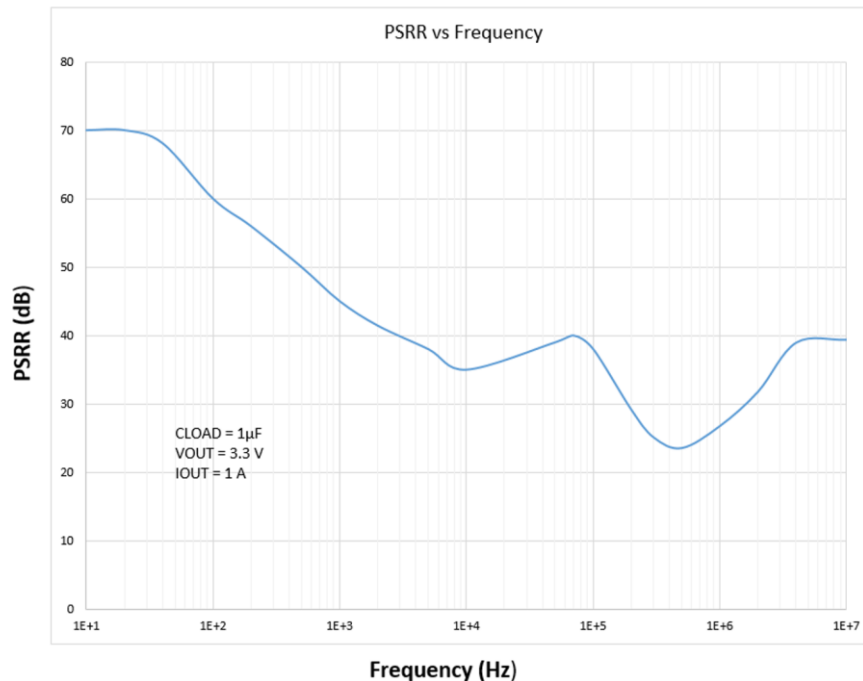


Figura 5.16 Răspunsul în frecvență al noului model de PSRR al TPS785-Q1

5.5 Analiza și compararea rezultatelor teoretice și simulate ale PSRR

Noua abordare pentru modelarea PSRR oferă performanțe mai bune la frecvențe sub 500 kHz, cu o eroare relativă de 0% până la 7%, comparativ cu eroarea modelului convențional care variază de la 5% până la 100%. Ambele modele prezintă rate de eroare mai mari peste 500 kHz din cauza amplificatorului de eroare, care necesită reproiectare pentru a obține o performanță a PSRR-ului mai bună la frecvențe înalte.

5.6 Concluziile capitolului 5

Acest capitol introduce o abordare nouă pentru îmbunătățirea parametrului PSRR al modelelor de LDO-uri pentru domeniul auto la frecvențe sub 500 kHz, folosind relații matematice și relații de circuit. *Acest concept a fost prezentat inițial într-unul dintre articolele de cercetare anterioare ale autorului [93].*

Pe baza modelului TPS785-Q1 de la Texas Instruments, a fost dezvoltat și integrat un nou model neliniar de PSRR. Simulările tranzitorii au arătat un comportament excelent sub 500 kHz cu o eroare mai mică de 7%, dar comportamentul începe să devieze de la caracteristica teoretică la frecvențe de peste 500 kHz din cauza amplificatorului de eroare. Modelele precise de LDO-uri sunt importante pentru simulările din domeniul auto, dar majoritatea nu au o caracterizare precisă a PSRR-ului.

Capitolul 6

Modelarea Circuitelor Interne ale unui BMS

6.1 Modelarea unui numărător digital crescător pentru BMS

Numărătoarele digitale sunt importante în sistemele digitale și de semnal mixt, incluzând și sistemele de management al bateriilor. Acest subcapitol prezintă o implementare nouă SPICE a unui numărător digital crescător pentru BMS-uri, cu ieșire pe patru biți.

Modelul SPICE al numărătorului digital pe patru biți este prezentat în Figura 6.2.

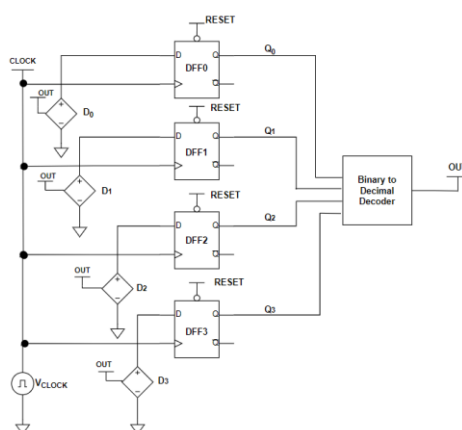


Figura 6.2 Mecanismul de funcționare al numărătorului crescător pe 4 biți

Figura 6.6 arată doar rezultatele simulării numărătorului cu un semnal de intrare (semnal de ceas) care are o frecvență de 100 kHz.

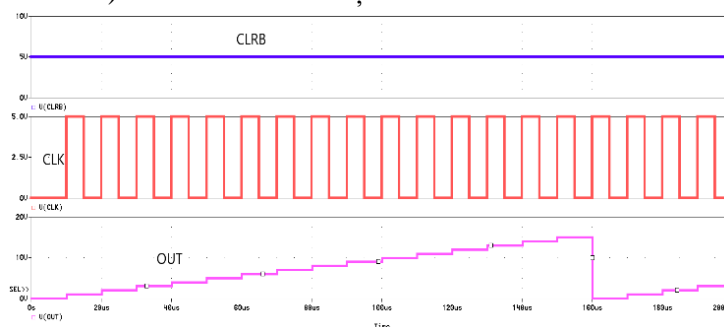


Figura 6.6 Rezultatele simulării pentru funcționarea normală a numărătorului incremental la 100 kHz

În acest subcapitol s-a propus o nouă implementare SPICE a numărătoarelor digitale crescătoare pentru BMS-uri, utilizând bistabili de tip D și conversia din binar în zecimal. Modelul reprezintă un numărător pe patru biți cu trei pini: CLK (semnal de ceas de intrare), CLRB (semnal de resetare) și OUT (ieșire zecimală). Acest model a fost detaliat într-un articol de cercetare anterior al autorului [119].

6.2 Funcționalitate îmbunătățită de numărare descrescătoare în SPICE

Majoritatea cercetărilor despre circuitele de numărare se concentrează pe proiectarea fizică a acestora.

Acest subcapitol introduce un model SPICE pentru numărătoare descrescătoare, care elimină limita de dimensiune a ieșirii. Modelul este validat în OrCAD Capture și testat pe intervalul de frecvențe de la 1 kHz până la 1 GHz.

Figura 6.10 arată schema modelului SPICE de numărător descrescător care are patru pini: OUT (ieșire), STARTING_VALUE (valoare inițială), CLK (semnal de ceas) și RESET (resetează la valoarea STARTING_VALUE).

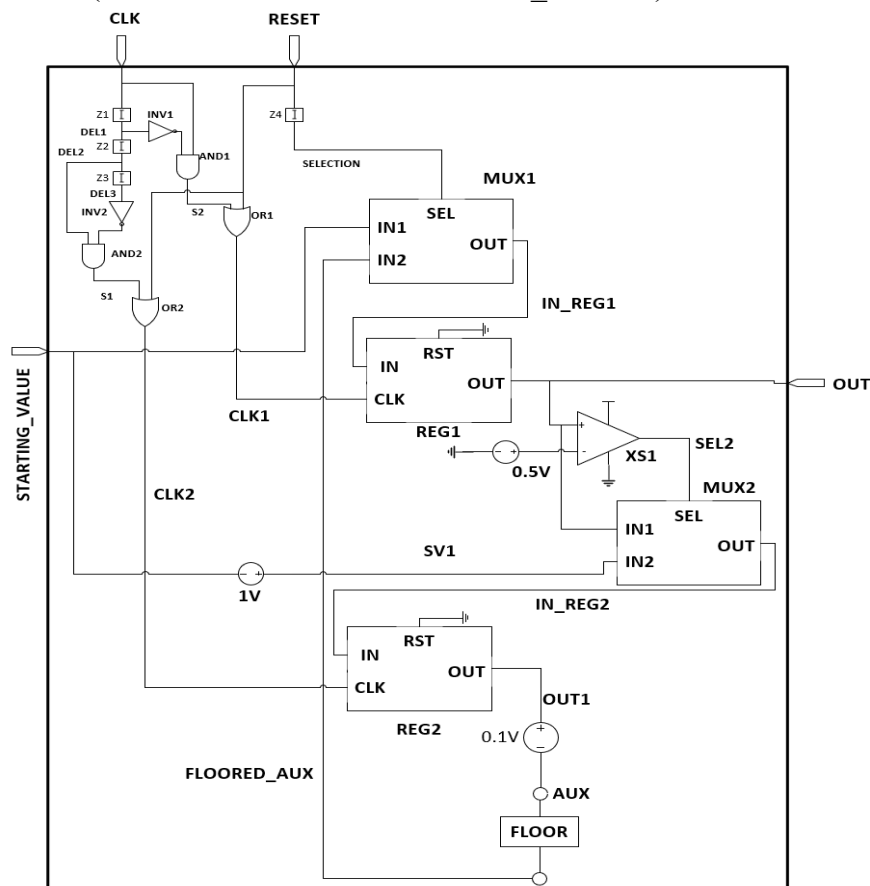


Figura 6.10 Diagrama bloc a modelului SPICE de numărător descrescător propus

Figura 6.14 arată doar formele de undă pentru un semnal de ceas de 1 MHz.

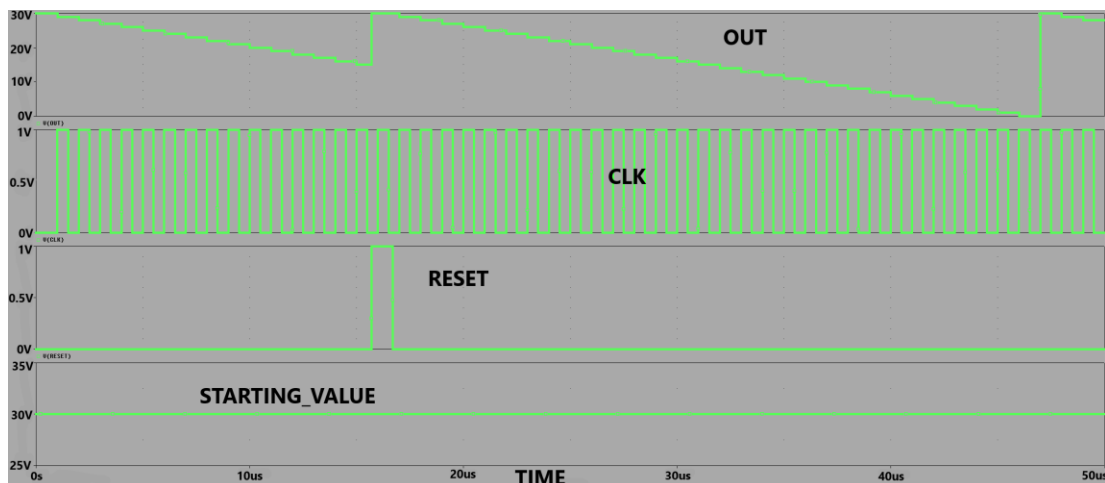


Figura 6.14 Formele de undă ale numărătorului descrescător la o frecvență de 1 MHz.

Subcapitolul 6.2 a introdus un model SPICE de numărător descrescător care decrementează de la orice valoare definită de utilizator și poate fi resetat pe parcursul simulării. *O publicație anterioară a autorului a detaliat acest model [120]*. Acesta elimină limita de dimensiune a ieșirii folosind o buclă de feedback, registre cu ieșire analogică și multiplexoare. Verificat cu OrCAD Capture de la 1 kHz până la 1 GHz, numărătorul funcționează corect.

6.3 Generarea semnalelor de ceas în SPICE

Subcapitolul 6.3 introduce o nouă abordare pentru generarea semnalelor de ceas de înaltă precizie în formă analogică, compatibilă cu toate simulatoarele SPICE, precum PSpice Allegro, SIMetrix, TINA și LTSpice. Această metodă asigură faptul că modelele de circuite integrate sincrone, necesare pentru BMS-uri, pot funcționa fără probleme pe toate platformele SPICE de simulare fără ajustări de sintaxă.

Figura 6.16 arată generatorul de semnal de ceas complet analogic.

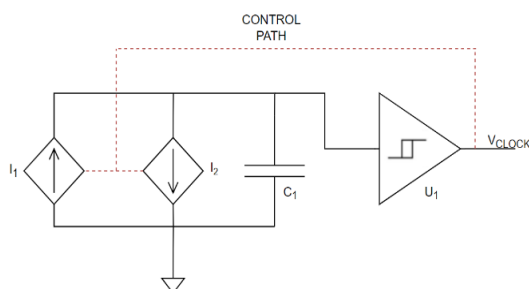


Figura 6.16 Principiul de operare al generatorului de semnal de ceas

Figura 6.19 prezintă o forma de undă a semnalului de ceas în OrCAD Capture CIS, cu o frecvență de comutare de 4 MHz, aleasă în scop demonstrativ.

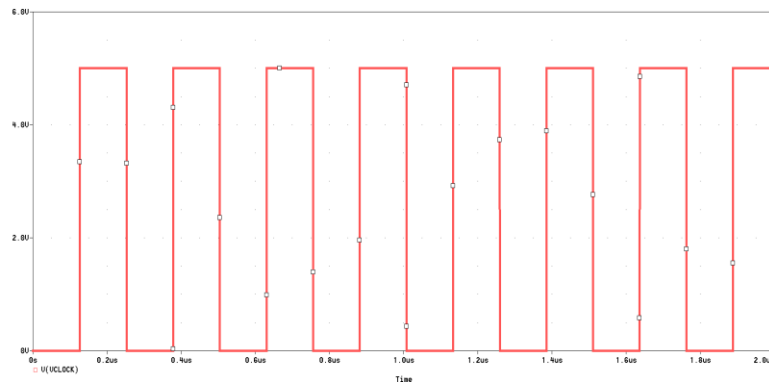


Figura 6.19 Forma de unda a semnalului de ceas în OrCAD Capture CIS cu o frecvență de 4 MHz

Eroarea relativă a frecvenței de ceas față de valoarea teoretică variază între 0,07% și 3,55%, cu deviația maximă apărând la o frecvență de 20 MHz.

Subcapitolul 6.3 a prezentat un nou generator de semnal de ceas analogic pentru simulatoarele bazate pe SPICE. *Compatibil cu OrCAD Capture CIS, SIMetrix, TINA și LTSpice, modelul a fost detaliat într-un articol anterior al autorului [121].*

6.4 Metodologie SPICE îmbunătățită de control al slew rate pentru modele de LDO-uri din domeniul auto

Subcapitolul 6.4 prezintă o tehnică optimizată de control al slew rate-ului pentru modelele de LDO-uri din domeniul auto, care poate fi utilizată și în modelarea BMS-urilor. Această tehnică a fost folosită pentru modelul de LDO TPS7B88-Q1 de la Texas Instruments și testată cu OrCAD Capture CIS.

Figura 6.28 ilustrează diagrama teoretică de start-up a LDO-ului TPS7B88-Q1 pentru un curent de ieșire de 150 mA și condensator de sarcină de 10 μ F. Măsurat între 10% și 90% din tensiunea finală, slew rate-ul teoretic ($SR_{\text{theoretical}}$) este de 25 V/ms.

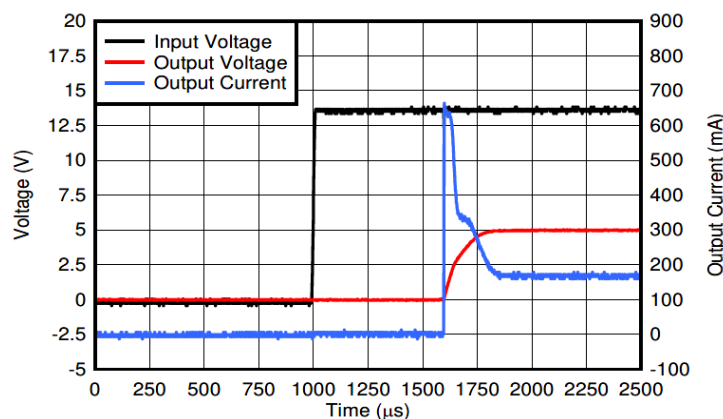


Figura 6.28 Diagrama de start-up a TPS7B88-Q1

Figura 6.30 arată comportamentul de start-up al modelului TPS7B88-Q1 furnizat de Texas Instruments. Măsurat între 10% (0,5 V) și 90% (4,5 V) din valoarea finală, slew rate-ul inițial simulat ($SR_{\text{initial, simulated}}$) este de 12,37 V/ms, cu o eroare ($ERR_{\text{initial, simulated}}$) de 50,52% comparativ cu valoarea teoretică de 25 V/ms.

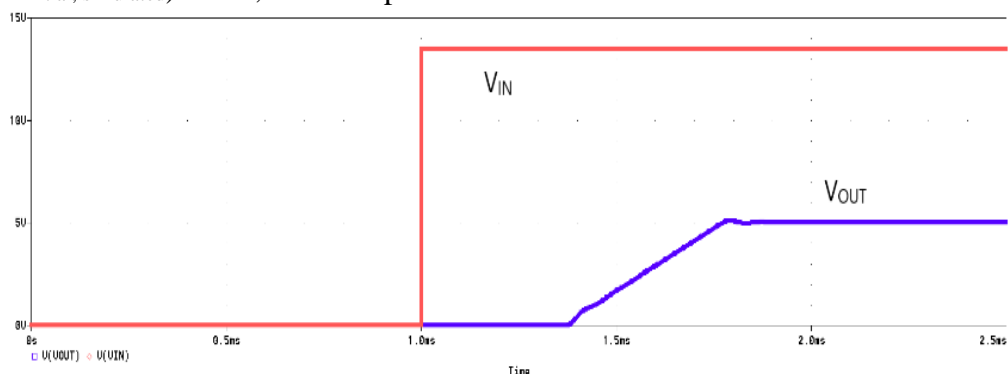


Figura 6.30 Forma de undă de start-up a modelului inițial TPS7B88-Q1

Figura 6.31 arată principiul tehnicii optimizate de control al slew rate-ului. Condensatorul C_{SR} stabilește slew rate-ul tensiunii de ieșire V_{OUT} , iar curentul prin ampermetrul A este folosit pentru a calcula valoarea acestuia în blocul Slew Rate Control.

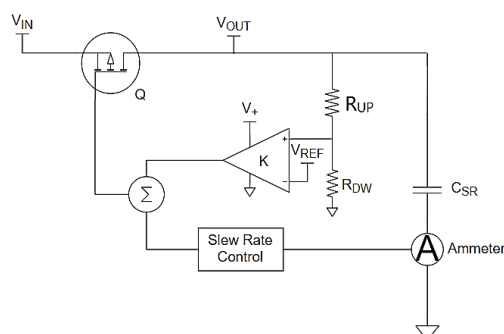


Figura 6.31 Diagrama noului model de LDO cu slew rate îmbunătățit

Figura 6.34 arată comportamentul LDO-ului cu noua tehnică de control a slew rate-ului. Noul slew rate este de 25,48 V/ms, rezultând o eroare de 1,92% față de valoarea teoretică de 25 V/ms.

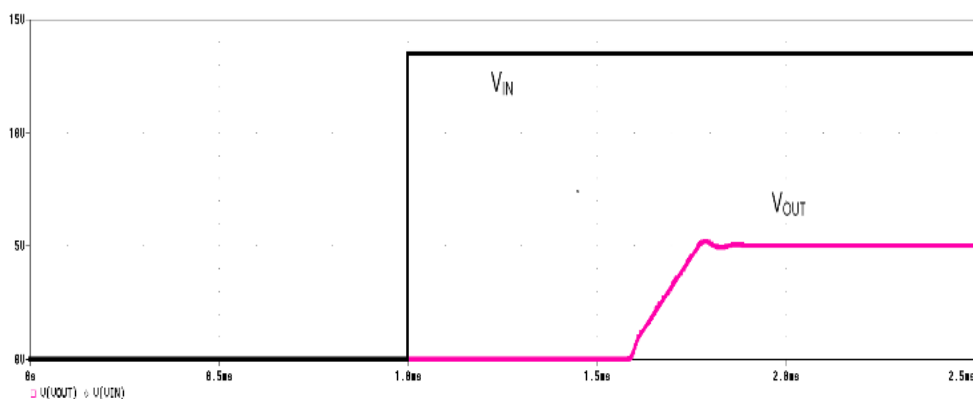


Figura 6.34 Comportamentul noului model al TPS7B88-Q1

Subcapitolul 6.4 a prezentat o metodologie optimizată de control al slew rate-ului pentru reglatoare LDO din domeniul auto, bazată pe principiul condensatorului, *detaaliată anterior în articolul de cercetare al autorului [142]*. Metoda a fost validată folosind regulatorul LDO TPS7B88-Q1 de la Texas Instruments, disponibil într-un format neencriptat pe site-ul producătorului.

6.5 O tehnică inovatoare pentru măsurarea frecvenței în simulatoarele SPICE

Cercetările existente se axează pe măsurarea fizică a frecvenței, ignorând simulările SPICE. Simulatoarele SPICE comerciale măsoară frecvența post-simulare, limitând sincronizarea circuitelor în timp real. Acest subcapitol introduce o nouă metodă pentru sincronizarea în timp real a semnalului de ceas în simulatoarele SPICE.

Metoda propusă măsoară frecvența ceasului și factorul de umplere. Aceasta face media eșantioanelor de perioadă măsurate ale semnalului de ceas, selectate de utilizator, pentru a obține rezultate precise.

Subcircuitul SPICE de măsurare a unei singure perioade de ceas, (*SINGLE_CLOCK_PERIOD_MEAS*), eșantionează o singură perioadă de ceas și face parte din blocul de măsurare a frecvenței ceasului.

Subcircuitul *MULTIPLE_CLOCK_PERIOD_MEAS* din Figura 6.41 măsoară multiple perioade de ceas utilizând două instanțe de *SINGLE_CLOCK_PERIOD_MEAS* (*XODD* și *XEVEN*).

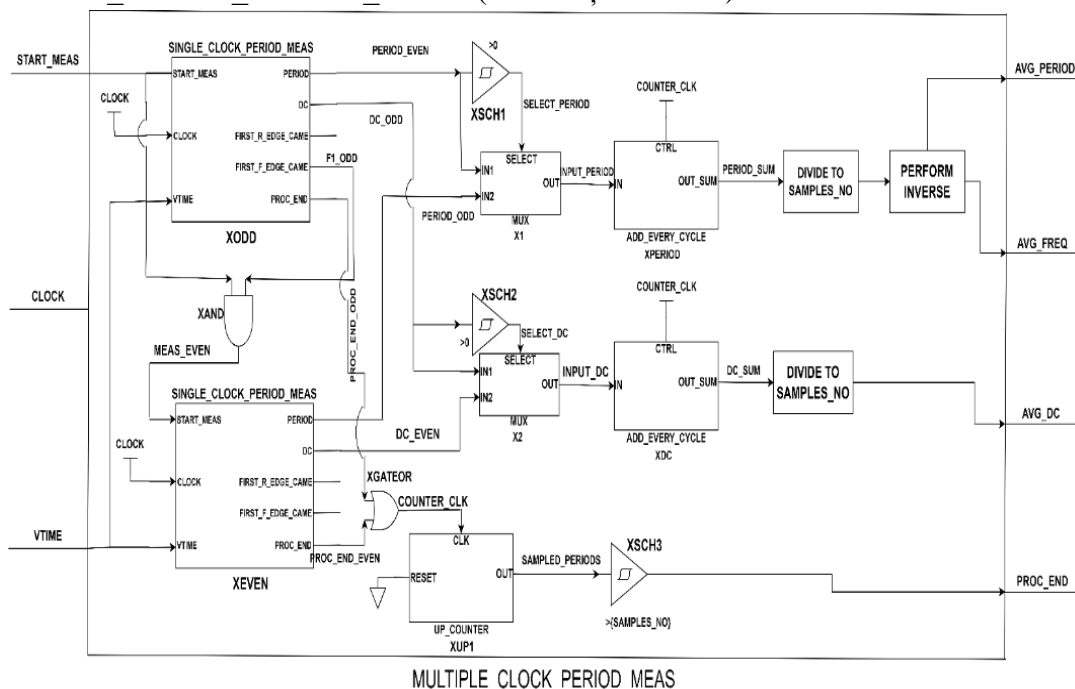


Figura 6.41 Schema SPICE a subcircuitului *MULTIPLE_CLOCK_PERIOD_MEAS*

Figura 6.48 arată formele de undă ale subcircuitului MULTIPLE_CLOCK_MEAS pentru o frecvență de ceas de 10 kHz, un factor de umplere de 0,2 și SAMPLES_NO = 100.

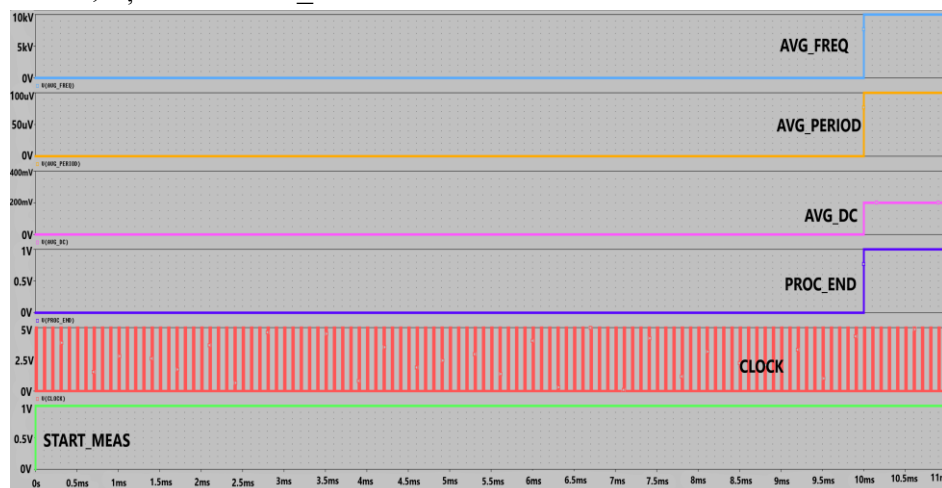


Figura 6.48 Formele de undă în OrCAD pentru o frecvență de ceas de 10 kHz, un factor de umplere de 0,2 și SAMPLES_NO = 100.

Simulatoarele SPICE convenționale măsoară frecvența și factorul de umplere doar după terminarea simulării. Subcapitolul 6.5 a introdus o metodologie inovatoare de măsurare a frecvenței în timp real în SPICE, *detaliată în publicația originală a autorului [143]*. Modelul măsoară frecvența semnalului de ceas, perioada și factorul de umplere. Verificat în OrCAD Capture, acesta oferă o precizie ridicată și simulare rapidă până la 1 GHz, fiind ideal pentru sincronizarea ceasului în diverse aplicații.

6.6 Concluziile capitolului 6

Capitolul 6 a detaliat modelarea unor circuite digitale, importante pentru dezvoltarea unui model complet de BMS.

Subcapitolul 6.1 a propus o nouă implementare SPICE a numărătoarelor digitale crescătoare pentru BMS-uri, arătând un comportament conform așteptărilor în toate configurațiile.

Subcapitolul 6.2 a introdus un model inovator de numărător descrescător în SPICE, demonstrând o funcționare corectă pe întreg spectrul de frecvență.

Subcapitolul 6.3 a prezentat un generator de semnal de ceas complet analogic pentru simulatoarele SPICE, care a dovedit o calitate înaltă și o eroare scăzută în generarea semnalului de ceas.

Subcapitolul 6.4 a descris o metodologie optimizată de control al slew rate-ului pentru regulatoarele LDO din domeniul auto, obținând performanțe și precizie ridicate.

Subcapitolul 6.5 a introdus o metodologie nouă de măsurare a frecvenței pentru simulatoarele bazate pe SPICE, prezentând o acuratețe bună și timpi de simulare rapizi până la 1 GHz.

Capitolul 7

Modelarea și Simularea SPICE a unui BMS Pasiv pentru Vehicule Electrice

Subcapitolul 2.1 evidențiază faptul că majoritatea studiilor despre BMS se axează pe proiectarea fizică. Simularea SPICE a fost folosită doar pentru anumite componente specifice din BMS. Capitolul 7 introduce un model SPICE complet pentru un BMS pasiv care monitorizează patru celule LiFePO₄ conectate în serie, dezvoltat utilizând programul OrCAD Capture.

Figura 7.2 arată diagrama bloc a BMS-ului propus.

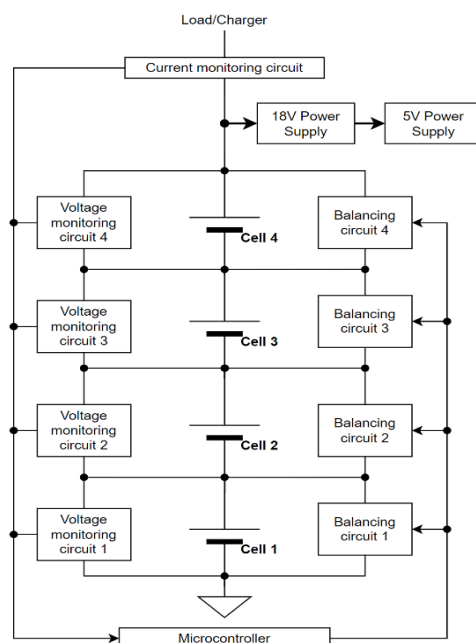


Figura 7.2 Diagrama bloc a modelului de BMS propus

7.1 Modelarea circuitelor interne ale BMS-ului

Modelul de BMS echilibrează patru celule LiFePO₄ conectate în serie. Această secțiune detaliază modelele circuitelor care fac parte din schema internă a BMS-ului : circuitul de monitorizare a tensiunii celulei, circuitul de monitorizare a curentului bateriei, circuitul de echilibrare pasivă a celulei, sursa de alimentare și microcontrolerul.

Figura 7.3 arată modelul circuitului de monitorizare a tensiunii celulei.

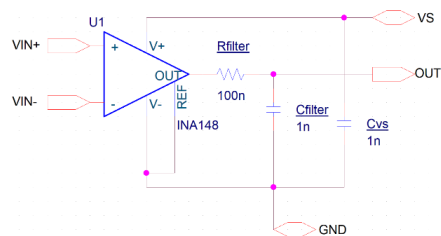


Figura 7.3 Schema modelului circuitului de monitorizare a tensiunii celulei

Figura 7.7 arată modelul circuitului de monitorizare a curentului prin pachetul de celule.

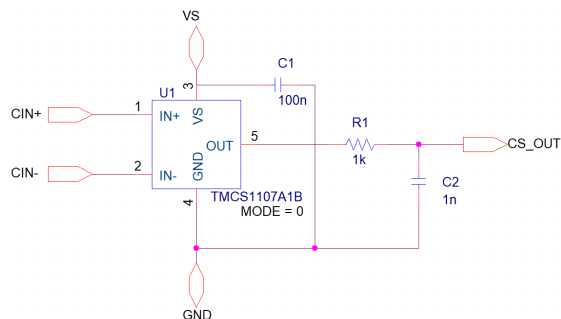


Figura 7.7 Schema modelului circuitului de monitorizare a curentului prin celule

Figura 7.10 arată modelul circuitului de echilibrare a celulei.

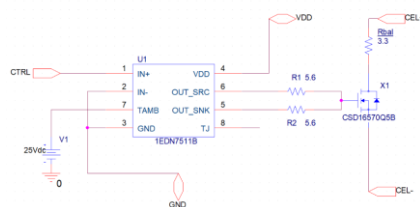


Figura 7.10 Schema modelului circuitului de echilibrare a celulei

Figura 7.16 arată modelul circuitului de alimentare.

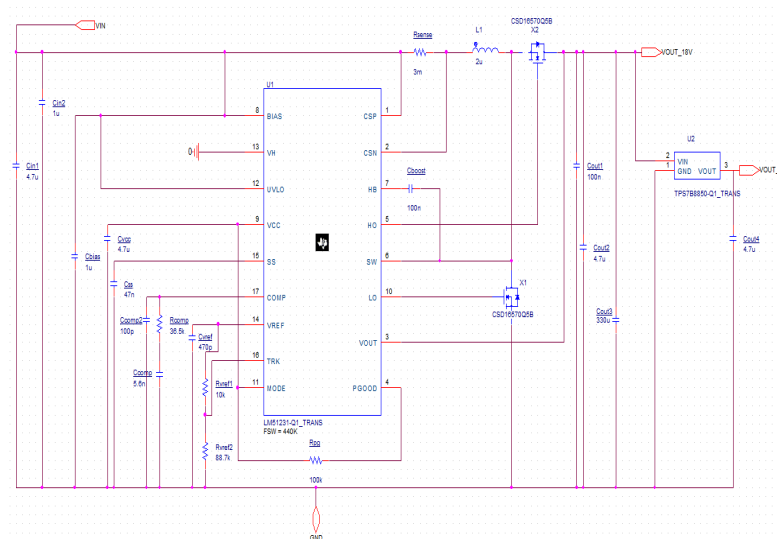


Figura 7.16 Schema modelului circuitului de alimentare

Figura 7.19 prezintă interfața modelului microcontrolerului.

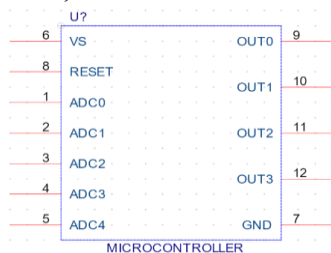


Figura 7.19 Interfața modelului de microcontroler

7.2 Modelul complet de BMS

Modelul complet de BMS integrează modelele individuale din subcapitolul 7.1 și modelul celulei LiFePO₄ din capitolul 3. Figura 7.24 arată schema detaliată a modelului final de BMS.

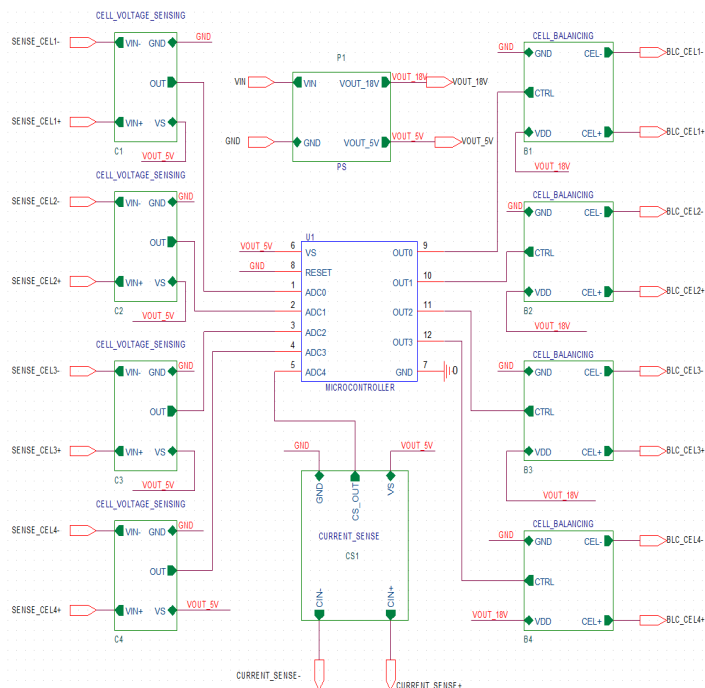


Figura 7.24 Schema modelului complet de BMS

7.3 Concluziile capitolului 7

Capitolul 7 introduce un model SPICE complet pentru un BMS care monitorizează patru celule LiFePO₄ conectate în serie. Acesta măsoară tensiunile celulelor, curentul de încărcare/descărcare și realizează echilibrarea pasivă. *Această lucrare a fost detaliată anterior în articolul original al autorului [26].*

Modelul a fost dezvoltat și testat în programul OrCAD Capture, demonstrând o precizie ridicată (eroare relativă de măsură a tensiunilor: 0,008% - 0,04%, eroare relativă de măsură a curentului: 1,5%). Acest model complet de BMS este important în domeniul auto, în sistemele de stocare a energiei, electronice portabile și sisteme fotovoltaice.

Capitolul 8

Proiectarea și Integrarea Fizică a unui BMS Pasiv cu Capabilitate de Monitorizare la Distanță pentru Platforme Auto

8.1 Proiectarea BMS-ului

Acest capitol detaliază proiectarea și implementarea unui BMS pasiv pentru patru celule LiFePO4 conectate în serie, având arhitectura sistemului prezentată în Figura 8.1.

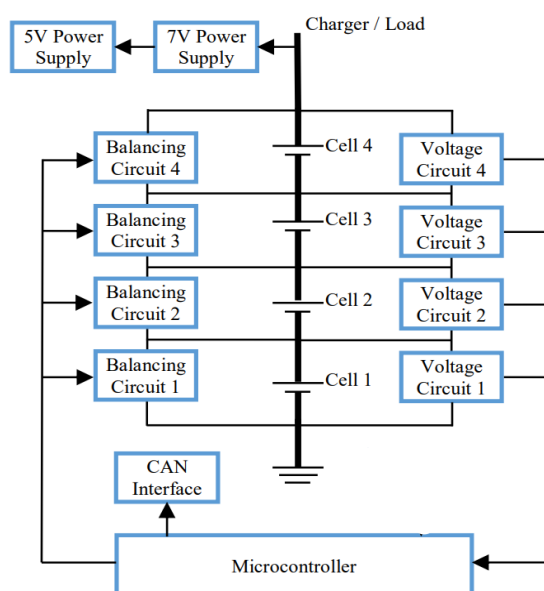


Figura 8.1 Arhitectura de sistem a BMS-ului propus

Figurile 8.13 și 8.14 arată schema BMS-ului pasiv, împărțită în secțiuni analogice și digitale pe PCB-uri (Printed Circuit Board) separate pentru a ușura procesul de testare. Figura 8.13 (analogic) include convertorul Buck și circuitele pentru monitorizarea și echilibrarea celulelor. Figura 8.14 (digital) prezintă microcontrolerul ATMEGA328P-AU, partea de achiziție a tensiunii celulelor, LED-urile (Light Emitting Diode) de semnalizare a egalizării, transmisia CAN (MCP2515, TJA1050T) și regulatorul LDO de 5 V.

8.2 Asamblarea PCB-urilor, integrarea și testarea BMS-ului propus

BMS-ul propus utilizează două PCB-uri. Primul PCB gestionează circuitele analogice, incluzând convertorul Buck, circuitele de echilibrare a celulelor și circuitele de monitorizare a tensiunii celulelor. Al doilea PCB este dedicat circuitelor digitale, conținând regulatorul LDO, microcontrolerul ATMEGA328P-AU, controlerul CAN MCP2515 și transceiverul CAN TJA1050T. Cele două PCB-uri pot fi verificate separat, astfel reducând procesul total de verificare.

Figura 8.16 arată PCB-ul analogic, iar Figura 8.17 prezintă PCB-ul digital.

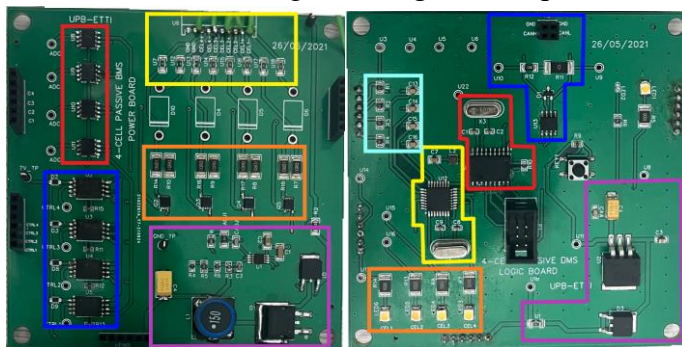


Figura 8.16 PCB-ul analogic Figura 8.17 PCB-ul digital

8.3 Rezultate și analiză comparativă

BMS-ul propus obține o eroare relativă de măsurare a tensiunii celulelor între 0% și 0,03% și un curent de echilibrare de 750 mA. Nizam et al. [186] au avut o eroare relativă de măsură a tensiunilor celulelor de 0,367% - 0,535% și un curent de egalizare de 200 mA. Xu et al. [187] au obținut o eroare de măsurare a tensiunii de 0% - 0,166%, fără a oferi detalii despre valoarea curentului de egalizare. Ramelan et al. [188] au obținut o eroare de 7,5% și un curent de 150 mA. Canilang et al. [9] au avut o eroare de 0,028% - 0,051% și un curent de 110 mA. BMS-ul propus este mai rapid și include, de asemenea, și monitorizarea de la distanță prin CAN.

8.4 Concluziile capitolului 8

Acest capitol a prezentat un BMS pasiv pentru patru celule LiFePO4 CA180FA conectate în serie, cu monitorizare de la distanță prin CAN, potrivit pentru aplicațiile auto. BMS-ul utilizează echilibrarea pasivă, având patru circuite de monitorizare a tensiunii celulei și patru circuite pentru echilibrarea celulei. *Această lucrare a fost detaliată într-un articol original anterior al autorului [27].*

Verificarea arată o eroare relativă maximă de monitorizare a tensiunii celulelor de 0,03% și o eroare relativă de setare a curentului de echilibrare de maximum 1,19%. De asemenea, BMS-ul poate să monitorizeze și să egalizeze și celulele Li-ion.

BMS-ul transmite tensiunile celulelor prin CAN cu 500 kbps și are un design modular, astfel încât el poate fi îmbunătățit pentru monitorizarea a și mai multor celule conectate în serie.

Capitolul 9

Concluzii

Întrucât, sistemele de management al bateriilor prezintă un interes ridicat în literatură recentă din domeniu, această teză de doctorat s-a axat atât pe modelarea SPICE a acestor sisteme, cât și pe proiectarea și implementarea fizică a acestora.

Pentru prima dată în literatură, a fost dezvoltat un model complet de simulare SPICE al unui BMS care poate să monitorizeze și să egalizeze patru celule LiFePO₄ conectate în serie. Modelul final de BMS include modele pentru circuitele de monitorizare a tensiunilor și a curentului, pentru circuitul de egalizare, pentru circuitul de alimentare, pentru microcontroler, dar și pentru celula LiFePO₄. Pentru a crește precizia acestor modele, au fost introduse tehnici noi de modelare a rezistenței în stare de conducție pentru tranzistoarele MOS și a PSRR-ului LDO-urilor din domeniul auto. De asemenea a fost detaliată modelarea unor circuite digitale importante în dezvoltarea modelului de BMS, precum: numărător digital crescător și descrescător, generator de semnal de ceas, circuit de control al slew rate-ului, și circuit de măsurare a frecvenței semnalului de ceas.

Echilibrarea pasivă este preferată în domeniul auto pentru simplitate, cost redus și ușurința în implementare, precum și pentru rata scăzută de defectare. BMS-urile moderne se bazează și pe monitorizarea la distanță pentru informații în timp real despre starea bateriei, dar această funcționalitate nu este studiată suficient în literatura de specialitate. Ținând cont și de aceste aspecte, teza de doctorat a detaliat, de asemenea, proiectarea și implementarea fizică a unui BMS pasiv pentru patru celule LiFePO₄ CA180FA conectate în serie, cu monitorizare la distanță prin CAN, destinat domeniului auto.

9.1 Rezultate obținute

Capitolul 1 subliniază importanța BMS-urilor în domeniul auto și în sistemele de stocare a energiei.

Capitolul 2 studiază stadiul actual al cercetării în domeniu, subliniind necesitatea dezvoltării unui model SPICE complet pentru BMS-uri și concluzionând faptul că echilibrarea pasivă este cea mai potrivită tehnică de egalizare pentru vehiculele hibride și electrice.

Capitolul 3 introduce un model SPICE pentru o celulă LiFePO₄ CALB CA180FA, care emulează cu precizie relația $OCV = f(SOC)$.

Capitolul 4 prezintă o nouă metodă pentru modelarea rezistenței în stare de conducție a tranzistoarelor MOS de putere.

Capitolul 5 propune o metodologie nouă pentru modelarea factorului PSRR al modelelor de LDO-uri din domeniul auto.

Capitolul 6 a detaliat modelarea SPICE a unor circuite digitale importante pentru dezvoltarea unui model complet de BMS.

Capitolul 7 introduce un model complet SPICE pentru un BMS care gestionează patru celule LiFePO₄ conectate în serie. Modelul de BMS are o precizie ridicată în măsurarea tensiunilor celulelor și a curentului de încărcare/descărcare.

Capitolul 8 prezintă proiectarea și implementarea fizică a unui BMS pasiv cu monitorizare la distanță bazată pe CAN pentru domeniul auto, obținând performanțe superioare în monitorizarea tensiunii comparativ cu alte sisteme similare propuse în literatură, precum și curenți de echilibrare mai mari.

Capitolul 9 prezintă concluziile acestei teze, precum și rezultatele obținute, contribuțiile originale și perspectivele viitoare de dezvoltare.

9.2 Contribuții originale

Contribuțiile originale ale autorului sunt enumerate pe capitole, după cum poate fi observat mai jos.

Capitolul 2:

- Identificarea unui gol semnificativ în literatură: nu a fost propus niciun model complet de BMS, pentru platformele de simulare SPICE sau alte platforme.
- Evidențierea importanței dezvoltării unui model SPICE complet pentru BMS-uri, pentru a simplifica procesul de proiectare fizică.
- Sublinierea necesității monitorizării de la distanță a parametrilor bateriei, care este o caracteristică a BMS-urilor moderne.

Capitolul 3:

- Dezvoltarea unui model SPICE pentru o celulă LiFePO₄ CALB CA180FA.
- Compatibilitatea modelului cu toate programele de simulare bazate pe SPICE: OrCAD Capture CIS, Pspice Allegro, TINA, SIMETRIX și LTSpice.

Capitolul 4:

- Introducerea unei abordări noi pentru modelarea rezistenței în stare de conducție a tranzistoarelor MOS de putere, care permite controlul precis al acestei rezistențe prin ajustarea dinamică a tensiunii poartă-sursă.
- Dezvoltarea unui nou model de tranzistor CSD13380F3 care prezintă o precizie ridicată în emularea caracteristicilor RDS_{ON} din fișa tehnică. Noul model este superior modelului inițial propus de Texas Instruments, având o eroare relativă maximă a RDS_{ON} de 0,8% comparativ cu 29,12% pentru modelul inițial.
- Adăugarea unui pin independent de temperatură, permițând utilizatorilor să ajusteze dinamic temperatura în timpul simulării, ceea ce permite emularea efectului de autoîncălzire al tranzistorului.

Capitolul 5:

- Introducerea unei metode noi pentru modelarea parametrului PSSR al reguletoarelor LDO din domeniul auto, realizată prin combinarea tehnicilor de modelare matematică cu concepte de circuite electronice.
- Dezvoltarea unui nou model de LDO pornind de la unul existent, care prezintă un comportament al PSRR excelent la frecvențe sub 500 kHz, cu o eroare relativă a

PSRR mai mică de 7% comparativ cu o eroare de 100% în cazul modelului inițial dezvoltat de Texas Instruments.

- Identificarea necesității de remodelare a amplificatorului de eroare, pentru a obține un PSRR precis pe întreaga gamă de frecvențe.

Capitolul 6:

- O implementare SPICE nouă a numărătoarelor digitale crescătoare pentru BMS-uri, care se comportă conform așteptărilor atât în timpul funcționării normale, cât și în timpul funcționării cu resetare.
- O abordare inovatoare pentru modelarea unui numărător descrescător în SPICE, care funcționează corect pe întregul spectru de frecvențe.
- O nouă abordare complet analogică pentru generarea semnalelor de ceas în simulatoarele bazate pe SPICE.
- O metodologie optimizată de control al slew rate-ului pentru regulatoarele LDO din domeniu auto, care prezintă performanțe ridicate, cu o eroare relativă de 1,92% comparativ cu o eroare de 50,52% obținută prin abordarea anterioară a celor de la Texas Instruments.
- O metodologie inovatoare de măsurare a frecvenței pentru sincronizarea ceasului în simulatoarele bazate pe SPICE, care demonstrează o acuratețe ridicată și timpi de simulare rapizi pentru frecvențe de până la 1 GHz.

Capitolul 7:

- Dezvoltarea pentru prima dată în literatură a unui model SPICE complet de BMS, proiectat special pentru un pachet format din patru celule LiFePO₄ conectate în serie, capabil să măsoare tensiunea fiecărei celule individuale, curenții de încărcare și descărcare pentru întregul pachet, precum și să realizeze echilibrarea pasivă a celulelor.
- Dezvoltarea fiecărui bloc al modelului complet de BMS: modelul circuitului de monitorizare a tensiunii celulei, modelul circuitului de echilibrare a celulei, modelul circuitului de monitorizare a curentului, modelul circuitului de alimentare, modelul microcontrolerului.
- Dezvoltarea algoritmului de echilibrare, care activează circuitul de echilibrare pentru orice celulă care are o tensiune cu cel puțin 25 mV mai mare decât tensiunea minimă a celulelor.

Capitolul 8:

- Proiectarea și implementarea fizică a unui BMS pasiv cu capabilitate de monitorizare la distanță, adaptat pentru domeniul auto, gestionând patru celule LiFePO₄ CA180FA conectate în serie, care obține performanțe superioare altor abordări similare din literatură în ceea ce privește acuratețea monitorizării tensiunii celulelor și viteza de echilibrare.
- Utilizarea unui design modular care oferă un avantaj cheie, permițând adăugarea de multiple celule conectate în serie, asigurând astfel viabilitatea pe termen lung a sistemului.
- Utilizarea unui design cu două PCB-uri care permite testarea și verificarea separată a fiecărei plăci.

- Obținerea unei erori de 0,03% în monitorizarea tensiunii celulelor și a unei erori de 1,19% în setarea curentului de echilibrare.
- Prezența monitorizării la distanță prin interfața CAN utilizând un protocol CAN standard la o rată de date de 500 kbps, caracteristică care nu a fost prioritizată în BMS-uri până acum.
- Demonstrarea versatilității BMS-ului prin capacitatea de a gestiona și echilibra și celule Li-ion.

9.3 Lista lucrărilor originale

Lista publicațiilor originale ale autorului cuprinde un total de 13 lucrări, dintre care 2 sunt publicate în reviste ISI Q1, 2 în reviste ISI Q2 și 9 prezentate la conferințe științifice între 2018-2024. Bibliografia oferă o listă completă a acestor lucrări științifice. Conținutul tuturor acestor lucrări menționate anterior este strâns legat de subiectul tezei de doctorat.

În perioada de doctorat (2020-2025), lista de publicații cuprinde un total de 11 lucrări, dintre care 2 sunt publicate în reviste ISI Q1, 2 în reviste ISI Q2 și 7 prezentate la conferințe științifice.

I. Articole publicate în jurnal științifice

1. **Guran, Ionuț-Constantin**, Adriana Florescu, and Lucian Andrei Perișoară, "Optimized Power Supply Rejection Ratio Modeling Technique for Simulation of Automotive Low-Dropout Linear Voltage Regulators", *Mathematics* 10, no. 7: 1150. <https://doi.org/10.3390/math10071150>, Categories/Classification: Research Areas Mathematics, Citation Topics 4. Electrical Engineering, Electronics & Computer Science, 2022, **WOS:000781254000001** (*revistă ISI Q1, Factor de Impact 2023 = 2,3*) [93]
2. **Guran, Ionuț-Constantin**, Adriana Florescu, and Lucian Andrei Perișoară, "A Novel ON-State Resistance Modeling Technique for MOSFET Power Switches", *Mathematics* 11, no. 1: 72. <https://doi.org/10.3390/math11010072>, Categories/Classification: Research Areas Mathematics, Citation Topics 4. Electrical Engineering, Electronics & Computer Science, 2023, **WOS:000909663000001** (*revistă ISI Q1, Factor de Impact 2023 = 2,3*) [68]
3. **I. -C. Guran**, A. Florescu and L. A. Perișoară, "A Novel Frequency Measurement Methodology for Clock Synchronization in SPICE-Based Simulators" in *IEEE Access*, vol. 11, pp. 117030-117039, 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3324883, **WOS:001096961500001** (*revistă ISI Q2, Factor de Impact 2023 = 3,4*) [143]
4. **I. -C. Guran**, A. Florescu and L. A. Perișoară, "SPICE Model of a Passive Battery Management System" in *IEEE Access*, vol. 12, pp. 4000-4014, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3349186, **WOS:001140270200001** (*revistă ISI Q2 jurnal, Factor de Impact 2023 = 3,4*) [26]

II. Articole prezentate în conferințe științifice

a) Lucrări originale înainte de stagiul doctoral (2020-2025)

1. L. A. Perișoară, **I. C. Guran** and D. C. Costache, "A Passive Battery Management System for Fast Balancing of Four LiFePO₄ Cells", *2018 IEEE 24th International Symposium for Design and Technology in Electronic Packaging (SIITME)*, Iasi, Romania, 2018, pp. 390-393, doi: 10.1109/SIITME.2018.8599258, **WOS:000466960400083** (*conferință ISI*) [101]

2. L. A. Perișoară, D. C. Costache, **I. C. Guran**, Ș. George Roșu and A. Florescu, "Active Balancing for Efficient Management of a 4S1P LiFePO₄ Battery Pack", *2019 11th International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering (ATEE)*, Bucharest, Romania, 2019, pp. 1-6, doi: 10.1109/ATEE.2019.8724917, **WOS:000475904500074 (conferință ISI) [98]**

b) Lucrări originale în timpul stagiului doctoral (2020-2025)

1. **Ionuț-Constantin Guran** and Lucian-Andrei Perișoară "MPPT solar charge controller for automotive industry", *Proc. SPIE 11718, 2020 Advanced Topics in Optoelectronics, Microelectronics and Nanotechnologies X, 117182Q (31 December 2020)*; <https://doi.org/10.1117/12.2572100>, **WOS:000641147900097 (conferință ISI) [189]**
2. **I. C. Guran**, L. Andrei Perișoară and A. Florescu, "SPICE Model Implementation for LiFePO₄ Cell", *2020 International Symposium on Fundamentals of Electrical Engineering (ISFEE)*, Bucharest, Romania, 2020, pp. 1-4, doi: 10.1109/ISFEE51261.2020.9756177, **WOS:000812321500046000466960400083 (conferință ISI) [30]**
3. **I. C. Guran**, L. A. Perișoară, A. Florescu and D. I. Săcăleanu, "4-Cell Passive Battery Management System for Automotive Applications", *2021 IEEE 27th International Symposium for Design and Technology in Electronic Packaging (SIITME)*, Timisoara, Romania, 2021, pp. 338-341, doi: 10.1109/SIITME53254.2021.9663604, **WOS:000786441900080 (conferință ISI) [20]**
4. **I. -C. Guran**, A. Florescu, L. -A. Perișoară, M. S. Teodorescu and I. B. Bacîș, "SPICE Implementation of Digital Counters for Battery Management Systems Used in Energy Storage Systems", *2022 14th International Conference on Electronics, Computers and Artificial Intelligence (ECAI)*, Ploiesti, Romania, 2022, pp. 1-4, doi: 10.1109/ECAI54874.2022.9847485 (*Conferință BDI indexată IEEE*) [119]
5. **I. -C. Guran**, A. Florescu, L. -A. Perișoară, A. Vasile and C. -D. Oancea, "Fully Analog Clock Signal Generator for SPICE based simulators", *2022 14th International Conference on Electronics, Computers and Artificial Intelligence (ECAI)*, Ploiesti, Romania, 2022, pp. 1-4, doi: 10.1109/ECAI54874.2022.9847455 (*Conferință BDI indexată IEEE*) [121]
6. **I. -C. Guran**, A. Florescu and L. -A. Perișoară, "Optimized Slew Rate Control Technique for Automotive Low-Dropout Linear Voltage Regulators Simulation Models", *2022 14th International Conference on Electronics, Computers and Artificial Intelligence (ECAI)*, Ploiesti, Romania, 2022, pp. 1-4, doi: 10.1109/ECAI54874.2022.9847436 (*Conferință BDI indexată IEEE*) [142]
7. **I. -C. Guran**, A. Florescu, L. A. Perișoară, M. Ș. Teodorescu, I. B. Bacîș and A. Vasile, "Advanced Down-Counting Operation in SPICE", *2023 13th International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering (ATEE)*, Bucharest, Romania, 2023, pp. 1-4, doi: 10.1109/ATEE58038.2023.10108172 (*Conferință BDI indexată IEEE*) [120]

9.4 Perspective de dezvoltare ulterioară

Dezvoltările ulterioare includ crearea unui model SPICE pentru un Automat cu Stări Finite (FSM) cu scopul de a crește complexitate modelului de microcontroler din BMS.

Modelul celulei LiFePO₄ va fi îmbunătățit pentru a include efectul de autoîncălzire și fluctuațiile de temperatură ambientală.

Algoritmul de echilibrare va fi modificat, adăugându-se metoda de numărare Coulomb pentru estimarea stării de încărcare a celulei.

BMS-ul va fi, de asemenea, îmbunătățit pentru a suporta monitorizarea curentului și a temperaturii, precum și creșterea numărului de celule la 16 celule LiFePO₄ conectate în serie, aliniindu-se cu trecerea industriei auto la sisteme de 48 V.

Bibliografie

- [11] T. Pattnaik, A. Garg, S. R. Verma, M. S. Ballal, M. G. Wath and S. A. Wakode, "Design of a Basic BMS: A Warning System," 2023 5th Biennial International Conference on Nascent Technologies in Engineering (ICNTE), Navi Mumbai, India, 2023, pp. 1-6, doi: 10.1109/ICNTE56631.2023.10146650.
- [14] T.-H. Wu, T.-Y. Pai, C.-H. Liu, and P.-Y. Chen, "Design of battery management system for electric vehicles," in Proc. Int. Symp. Intell. Signal Process. Commun. Syst. (ISPACS), Hualien City, Taiwan, Nov. 2021, pp. 1–2, doi: 10.1109/ISPACS51563.2021.9650999.
- [15] H. Liu, Y. Li, B. Duan, and L. Li, "Development and application of battery management system for storage system of the auxiliary power unit of EMUs," in Proc. 4th Int. Conf. Smart Power Internet Energy Syst. (SPIES), Beijing, China, Dec. 2022, pp. 1911–1915, doi: 10.1109/SPIES55999.2022.10082066.
- [16] G. Prakasha, S. S. Kumar, K. N. S. Kumar, A. B. Darshan, and G. Venkatesha, "Electric vehicle battery power management system analysis," in Proc. Int. Interdiscipl. Humanitarian Conf. Sustainability (IIHC), Bengaluru, India, Nov. 2022, pp. 1179–1183, doi: 10.1109/IIHC55949.2022.10060304.
- [17] S. Ding, S. Liu, H. Chen, Y. Yang, and J. Huang, "Research on battery management system based on flyback DC-AC converter," in Proc. IEEE 6th Inf. Technol. Mechatron. Eng. Conf. (ITOEC), Chongqing, China, Mar. 2022, pp. 802–806, doi: 10.1109/ITOEC53115.2022.9734330.
- [18] M. H. Rehman, A. Alam, and A. Q. Ansari, "Design of a cost-effective IoT based battery management system for electric vehicles," in Proc. Int. Conf. Power, Instrum., Energy Control (PIECON), Aligarh, India, Feb. 2023, pp. 1–5, doi: 10.1109/PIECON56912.2023.10085853.
- [19] S. Gullu, M. T. Elrais, I. Batarseh, M. Salameh, and S. Al-Hallaj, "High voltage battery management system hardware and software design for photovoltaic energy systems," in Proc. IEEE 7th Southern Power Electron. Conf. (SPEC), Nadi, Fiji, Dec. 2022, pp. 1–5, doi: 10.1109/SPEC55080.2022.10058391.
- [20] **I. C. Guran**, *L. A. Perișoară, A. Florescu, and D. I. Sacaleanu*, "4-cell passive battery management system for automotive applications," in Proc. IEEE 27th Int. Symp. Design Technol. Electron. Packag. (SIITME), Timisoara, Romania, Oct. 2021, pp. 338–341, doi: 10.1109/SIITME53254.2021.9663604.
- [21] A. Nath and B. Rajpathak, "Analysis Of Cell Balancing Techniques In BMS For Electric Vehicle," 2022 International Conference on Intelligent Controller and Computing for Smart Power (ICICCSP), Hyderabad, India, 2022, pp. 1-6, doi: 10.1109/ICICCSP53532.2022.9862513.
- [22] M. Kumar, V. K. Yadav, K. Mathuriya and A. K. Verma, "A Brief Review on Cell Balancing for Li-ion Battery Pack (BMS)," 2022 IEEE 10th Power India International Conference (PIICON), New Delhi, India, 2022, pp. 1-6, doi: 10.1109/PIICON56320.2022.10045109.
- [23] S. Karmakar, A. K. Bohre and T. K. Bera, "Novel PID Controller-Based Passive Cell Balancing for BMS," 2023 IEEE 3rd International Conference on Smart Technologies for Power, Energy and Control (STPEC), Bhubaneswar, India, 2023, pp. 1-4, doi: 10.1109/STPEC59253.2023.10430531.

- [24] S. Dalvi and S. Thale, "Design of DSP Controlled Passive Cell Balancing Network based Battery Management System for EV Application," 2020 IEEE India Council International Subsections Conference (INDISCON), Visakhapatnam, India, 2020, pp. 84-89, doi: 10.1109/INDISCON50162.2020.00029.
- [26] **I. -C. Guran**, A. Florescu and L. A. Perișoară, "SPICE Model of a Passive Battery Management System," in *IEEE Access*, vol. 12, pp. 4000-4014, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3349186.
- [27] **Guran, Ionuț-Constantin**, Adriana Florescu, Nicu Bizon, and Lucian Andrei Perișoară. 2025. "Fast-Balancing Passive Battery Management System with Remote Monitoring for the Automotive Industry" *Electronics* 14, no. 13: 2606, doi: 10.3390/electronics14132606
- [30] **I. C. Guran**, L. Andrei Perișoară and A. Florescu, "SPICE Model Implementation for LiFePO4 Cell," 2020 International Symposium on Fundamentals of Electrical Engineering (ISFEE), Bucharest, Romania, 2020, pp. 1-4, doi: 10.1109/ISFEE51261.2020.9756177.
- [68] **Guran, Ionuț-Constantin**, Adriana Florescu, and Lucian Andrei Perișoară. 2023. "A Novel ON-State Resistance Modeling Technique for MOSFET Power Switches" *Mathematics* 11, no. 1: 72. <https://doi.org/10.3390/math11010072>
- [93] **Guran, I.-C.**; Florescu, A.; Perișoară, L.A. Optimized Power Supply Rejection Ratio Modeling Technique for Simulation of Automotive Low-Dropout Linear Voltage Regulators. *Mathematics* **2022**, 10, 1150. <https://doi.org/10.3390/math10071150>
- [119] **I. -C. Guran**, A. Florescu, L. -A. Perișoară, M. S. Teodorescu and I. B. Bacîș, "SPICE Implementation of Digital Counters for Battery Management Systems Used in Energy Storage Systems," 2022 14th International Conference on Electronics, Computers and Artificial Intelligence (ECAI), Ploiesti, Romania, 2022, pp. 1-4, doi: 10.1109/ECAI54874.2022.9847485.
- [120] **I. -C. Guran**, A. Florescu, L. A. Perișoară, M. Ș. Teodorescu, I. B. Bacîș and A. Vasile, "Advanced Down-Counting Operation in SPICE," 2023 13th International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering (ATEE), Bucharest, Romania, 2023, pp. 1-4, doi: 10.1109/ATEE58038.2023.10108172.
- [121] **I. -C. Guran**, A. Florescu, L. -A. Perișoară, A. Vasile and C. -D. Oancea, "Fully Analog Clock Signal Generator for SPICE based simulators," 2022 14th International Conference on Electronics, Computers and Artificial Intelligence (ECAI), Ploiesti, Romania, 2022, pp. 1-4, doi: 10.1109/ECAI54874.2022.9847455.
- [142] **I. -C. Guran**, A. Florescu and L. A. Perișoară, "Optimized Slew Rate Control Technique for Automotive Low-Dropout Linear Voltage Regulators Simulation Models," 2022 14th International Conference on Electronics, Computers and Artificial Intelligence (ECAI), Ploiesti, Romania, 2022, pp. 1-4, doi: 10.1109/ECAI54874.2022.9847436.
- [143] **I. -C. Guran**, A. Florescu and L. A. Perisoara, "A Novel Frequency Measurement Methodology for Clock Synchronization in SPICE-Based Simulators," in *IEEE Access*, vol. 11, pp. 117030-117039, 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3324883.