



**UNIVERSITATEA NATIONALA DE STIINTA SI TEHNOLOGIE
POLITEHNICA BUCURESTI**

ȘCOALA DOCTORALĂ INGINERIE ELECTRICĂ

TEZĂ DE DOCTORAT

**CONTRIBUȚII PRIVIND POSIBILITATEA REUTILIZĂRII
BATERIILOR
ÎN ALIMENTAREA ELECTRICĂ A CENTRELOR DE DATE**

REZUMAT

ing. GKANATSIOS STAVROS

Conducător de doctorat: Prof. univ. emerit dr. ing. Costin CEPIȘCĂ

BUCUREȘTI

2023

Cuvinte cheie: Alimentare electrica, Centru Date, UPS, Baterii, Modelare

Cuvânt de mulțumire

Deosebite mulțumiri domnului prof. univ. emerit dr. ing. Costin Cepișcă pentru îndrumarea continuă, de înaltă calitate științifică, care m-a ajutat să finalizez cercetările cu această teză de doctorat.

Doresc sa mulțumesc profesorilor din cadrul Departamentului Măsurări, aparate electrice și convertoare statice din cadrul facultății de Inginerie electrică a Universității POLITEHNICA din București, pentru sprijinul acordat în finalizarea tezei de doctorat, în special domnului profesor dr.ing. George Călin Serișan și domnului conf. dr.ing. Bogdan Enache.

Mulțumesc în mod special familiei pentru sprijinul, încurajările și înțelegerea oferite permanent.

Autorul

Cuprins Teză

Introducere	4
Capitolul 1. Situația actuală a dezvoltării tehnice a Centrelor de Date	5
1.1. Centre de date (DC) – definiții și standarde.....	5
1.2. Arhitecturi și soluții constructive pentru Centrele de Date.....	5
1.3. Centre de Date pe plan național și internațional.....	6
1.4. Infrastructura unui Centru de Date	78
Capitolul 2. Soluții pentru alimentarea cu energie electrică a Centrului de Date	8
2.1. Topologii și standarde	8
2.2. Exemplu de alimentare cu energie a unui Centrului de Date Tier 3 cu includere echipamente de generare a energiei solare	9
2.3. Aprecierea eficienței energetice a Centrului de Date	30
Capitolul 3. Sistemul UPS și folosirea bateriilor	32
3.1. Structura unui sistem UPS.....	9
3.2. Stocarea electrochimică a energiei electrice	10
3.3. Parametrii funcționali ai bateriilor	40
3.4. Testarea bateriilor pentru determinarea parametrilor	12
3.5. Modelarea bateriilor	13
3.6. Sisteme de management pentru baterii (BMS)	Eroare! Marcaj în document nedefinit.
Capitolul 4. Modelarea unui sistem UPS	14
4.1. Schema bloc a sistemului UPS.....	14
4.2. Redresorul din cadrul UPS	60
4.3. Bancul de baterii din cadrul UPS	Eroare! Marcaj în document nedefinit.
4.4. Circuitul Boost	18
4.5. Invertorul	18
4.6. Filtru L-C-L.....	70
Capitolul 5. Extinderea modelului bancului de baterii pentru a încorpora diferite tehnologii	72
5.1. Extinderea modelului pentru o baterie Pb-acid	73
5.2. Extinderea modelului pentru o baterie Li-Ion	22
5.3. Extinderea modelului pentru o baterie LiFePO ₄ second-life	81
Capitolul 6. Proiectarea și realizarea unui sistem de determinare a stării de sănătate a unei baterii PB-acid care echipează un UPS	29
6.1. Metoda celor două impulsuri de descărcare	29

CONTRIBUȚII PRIVIND POSIBILITATEA REUTILIZĂRII BATERIILOR
ÎN ALIMENTAREA ELECTRICĂ A CENTRELOR DE DATE

6.2. Structura hardware a sistemului propus	30
6.3. Structura software a sistemului propus	91
6.4. Calibrarea sistemului de determinare a SoC și SoH dezvoltat.....	32
6.5. Rezultate experimentale la determinarea a SoC și SoH a bateriilor care echipează UPS-uri.....	34
Concluzii.....	102
Concluzii generale.....	102
Contribuții personale	102
Bibliografie.....	104
Anexa.....	108

Introducere

Dezvoltarea accentuată a producției de baterii pentru vehiculele electrice conduce, în viitorul apropiat, la apariția unei cantități însemnate de baterii ce se înlocuiesc dar care mai pot fi folosite în unele aplicații de stocare a energiei electrice ce nu necesită funcționare la șocuri rapide de încărcare/descărcare.

Dintre soluțiile posibile de reutilizare m-am oprit la folosirea bateriilor în alimentarea de urgență a Centrelor de Date. Actualele UPS-uri folosesc baterii clasice Plumb-acid dar, prin apariția bateriilor Li-Ion înlocuite la vehiculele electrice, apare o piață importantă de baterii ce necesită posibilități tehnice de testare a capacităților de folosire în cadrul structurilor energetice ale Centrelor de Date sau în alte situații de stocare a energiei electrice.

Obiectivul cercetărilor desfășurate în cadrul acestei teze de doctorat constă în realizarea unor modele extinse pentru bateriile posibil de folosit în structura UPS-urilor din Centrelor de Date, de tip Pb-acid, Li-Ion, Li-Ion second life, modele care se utilizează în proiectarea și realizarea unui sistem de determinare a stării de sănătate a bateriilor care echipează un UPS.

Capitolul 1 al tezei de doctorat prezintă dezvoltarea actuală a Centrelor de Date, soluții constructive, infrastructuri și realizări tehnice.

Capitolul 2 se referă la soluțiile tehnice pentru alimentarea cu energie electrică a Centrelor de Date și la modalitatea de apreciere a eficienței energetice.

Capitolul 3 analizează sistemul UPS și folosirea bateriilor, indicând structura sistemului, tehnologiile de realizare pentru baterii, metodele de testare, modelare și de management a funcționării.

Capitolul 4 conține modelul realizat pentru un sistem UPS cu pachetul software Matlab Simulink/ Simscape. S-a optat pentru o analiză în domeniul timp, pornind de la ecuațiile matematice ale fiecărei componente a sistemului UPS. Acest model permite analiza funcționării și determinarea caracteristicilor dinamice în diferite condiții de utilizare.

Capitolul 5 prezintă rezultatele cercetărilor referitoare la extinderea modelului bancului de baterii pentru a încorpora diferite tehnologii de realizare. Soluțiile proprii dezvoltate pentru caracterizarea parametrilor bateriilor și a ansamblului încorporat în structura UPS demonstrează că există soluții viabile de înlocuire a bateriilor cu Pb-acid care echipează UPS-urile din Centrelor de Date cu baterii Li-Ion second life.

Capitolul 6 conține cercetările privitoare la determinarea momentului optim de înlocuire a bateriilor ținând cont de starea de sănătate a acestora. Primul pas în proiectarea unui dispozitiv dedicat a fost analiza metodelor de determinare a vârstei bateriei, cu alegerea metodei celor două impulsuri de descărcare. A fost realizat practic, hardware și software, un dispozitiv inteligent ce permite determinarea stării de încărcare și a sării de sănătate a bateriei, rezultatele experimentale evidențiind aplicabilitatea metodei folosite. Acest dispozitiv se poate atașa la UPS-ul dintr-un Centru de Date sau din altă structură de stocare a energiei electrice pentru a asigura managementul bateriilor, indiferent de tipul acestora.

CAPITOLUL 1. Situația actuală a dezvoltării tehnice a Centrelor de Date

1.1. Centre de date (DC) – definiții și standarde

Centrul de date este definit de standardul ANSI/TIA-942 ca fiind:

“O clădire sau parte a unei clădiri a cărei funcție primară este de a găzdui un computer room și zonele de suport corespunzătoare ” [1].

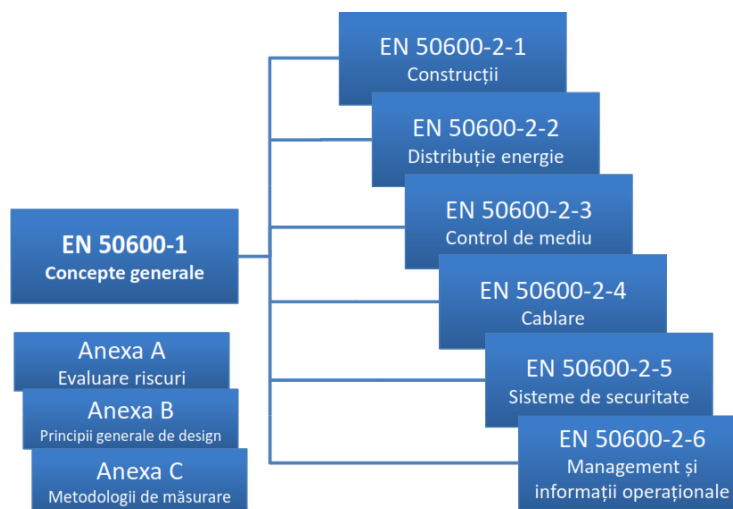


Fig.1.1. Standard EN 50600 [3]

Standardul EN 50600 aduce clarificări pentru operatorii și beneficiarii Centrelor de Date, prin specificații clare privitoare la planificarea, construcția și operarea infrastructurilor de tip Centru de Date - Fig.1.1.

1.2. Arhitecturi și soluții constructive pentru Centrele de Date

Un Centru de Date conține întotdeauna [10]:

- un loc pentru a localiza serverele, switch-urile și echipamentele de stocare;
- echipamente necesare asigurării condițiilor de mediu corespunzătoare pentru funcționarea optimă a echipamentelor IT ;
- modalități de conectare la servere pentru clienții interni și externi;
- soluție de alimentare cu energie în condiții de capacitate și perioadă de timp corespunzătoare pentru ca echipamentele IT să funcționeze continuu.

Standardul ANSI/TIA-942 stabilește 4 nivele de fiabilitate și reziliență (Tier) de implementare a Centrului de Date pe baza asigurării unei fiabilități operaționale dorite cuprinsă între 99,671% disponibilitate funcțională (maxim 28,8 ore/an opriri alimentare) și 99,995% (maxim 0,4 ore/an întrerupere alimentare). Alegerea unui anumit nivel (Tier) pentru realizarea Centrului de Date conduce la dimensionarea structurii de implementare și a numărului de echipamente redundante. În Tabelul 1 sunt prezentate cerințele principale și comparații dintre niveluri (Tier).

CONTRIBUȚII PRIVIND POSIBILITATEA REUTILIZĂRII BATERIILOR
ÎN ALIMENTAREA ELECTRICĂ A CENTRELOR DE DATE

Tabel 1. Standarde de performanță în funcție de nivel (Tier)

Cerință Tier	Tier 1	Tier 2	Tier 3	Tier 4
Sursă	Sistem	Sistem	Sistem	Sistem + Sistem
Redundanța componentelor sistemului	N	N+1	N+1	Minim N+1
Căi de distribuție	1	1	1 normală 1 alternativă	2 active simultan
Compartimentare	Nu	Nu	Nu	Da
Cu mentenanță concomitentă	Nu	Nu	Da	Da
Toleranță la defectări (eveniment unic)	Nu	Nu	Nu	Da

1.3. Centre de Date pe plan național și internațional

O situație a evoluției investițiilor din domeniul centrelor de date la nivel mondial este prezentată în figura următoare, susținând tendințele de dezvoltare.

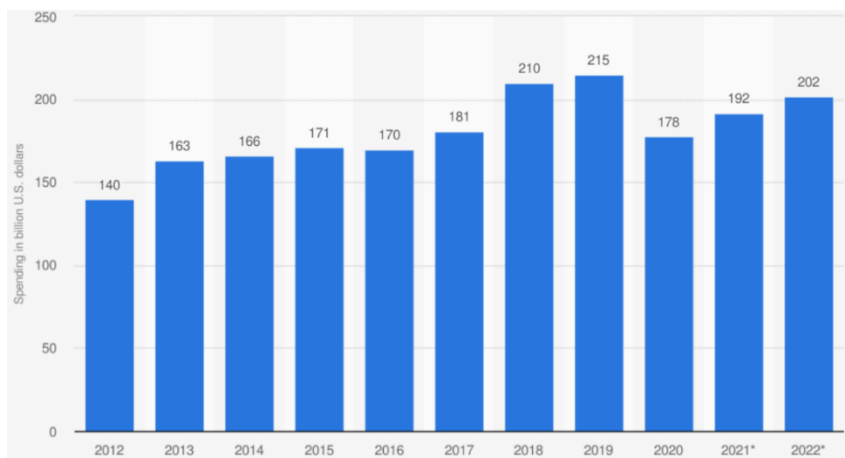


Fig.1.9. Investiții în Centre de Date pe glob (2012-2022). Sursa:www.statistia.com

La nivelul anului 2021 erau funcționale 2594 de Centre de Date de diferite mărimi de la 295 distribuitori, cele mai multe în țările indicate în figura următoare

În teza se prezintă diferite soluții implementate la nivel mondial și național.

CONTRIBUȚII PRIVIND POSIBILITATEA REUTILIZĂRII BATERIILOR ÎN ALIMENTAREA ELECTRICĂ A CENTRELOR DE DATE

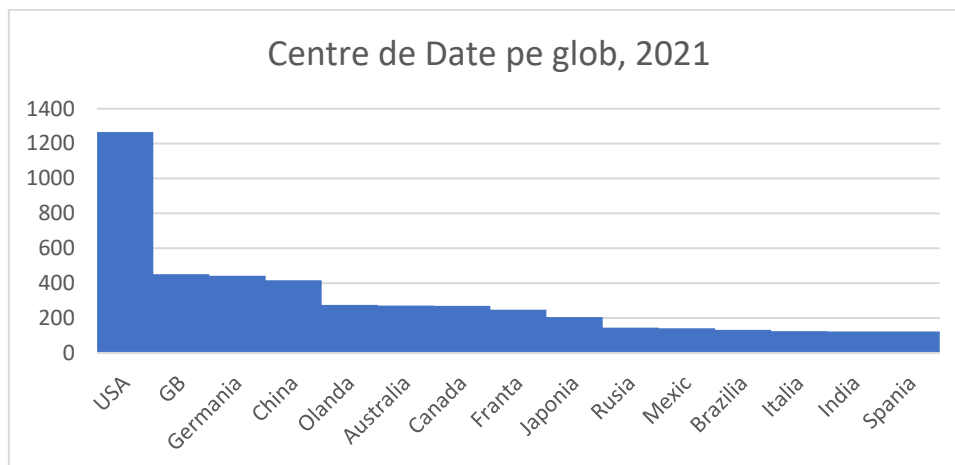


Fig.1.10. Centre de Date pe glob. Sursa: www.statista.com

1.4. Infrastructura unui Centru de Date

Arhitectura funcțională a unui Centru de Date [19], cuprinde, pe lângă infrastructura de calcul și comunicații (servere, software specific, arhivare date, genomul de stadializare date, prezentarea datelor, monitorizare în timp real, gestionarea capacității) și alte echipamente ce asigură funcționalitatea acestuia.

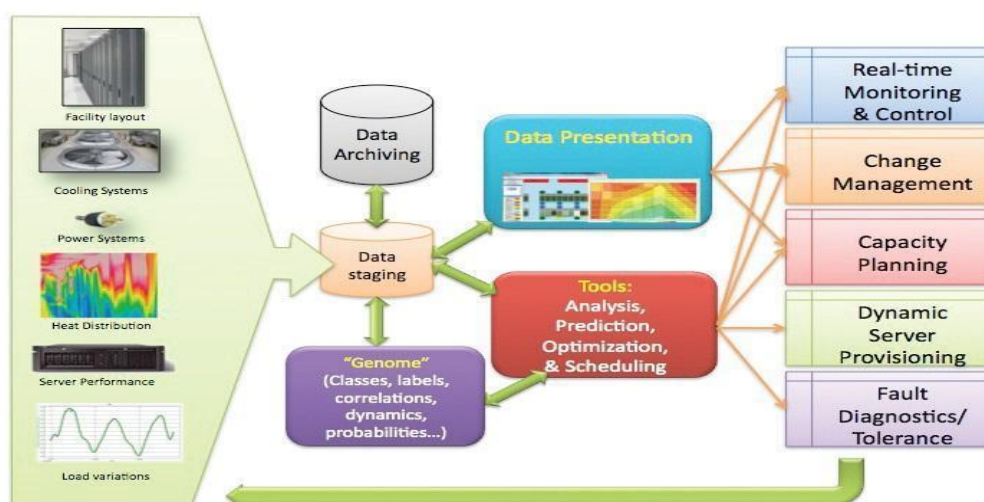


Fig.1.18. Arhitectură Centru de Date [20].

Se poate observa că infrastructura fizică din Centrul de Date este reprezentată de: electroalimentare, distribuție electrică, climatizarea de precizie, rack-uri, stingere incendii, control acces, monitorizarea condițiilor de mediu și managementul infrastructurii. [20]

Sistemul de alimentare cu energie electrică: o prezentare succintă este indicată în Fig.1.20 [21].

CONTRIBUȚII PRIVIND POSIBILITATEA REUTILIZĂRII BATERIILOR ÎN ALIMENTAREA ELECTRICĂ A CENTRELOR DE DATE

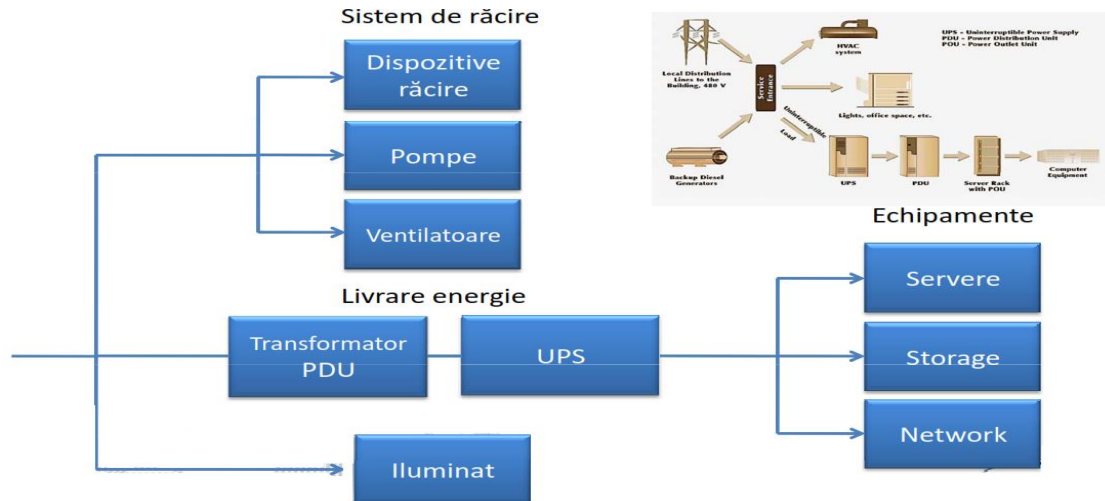


Fig.1.20. Structură sistem alimentare cu energie electrică pentru Centru de Date [22].

CAPITOLUL 2. Soluții pentru alimentarea cu energie electrică a Centrului de Date

2.1. Topologii și standarde

În Fig.2.1 se indică repartiția tip a consumului de energie la un Centru de Date.

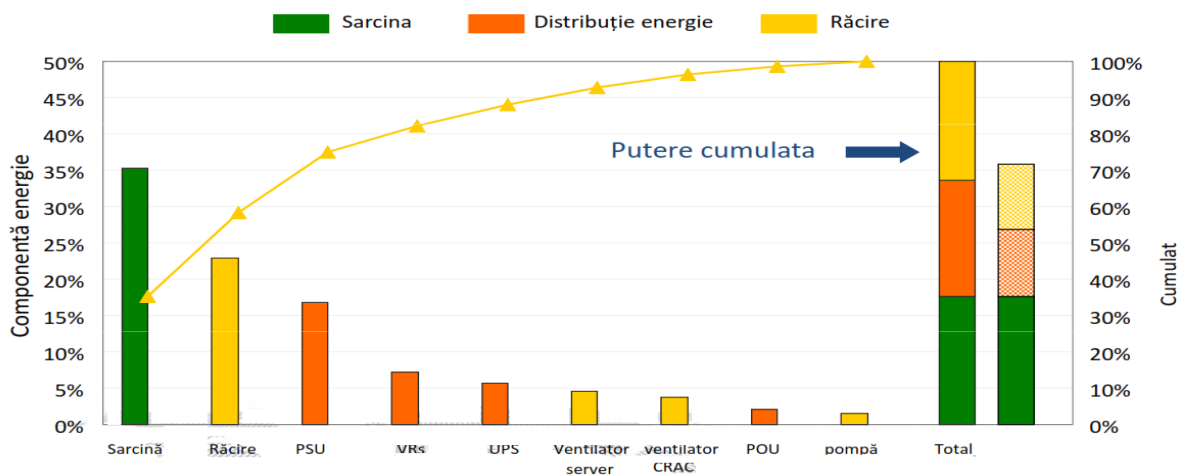


Fig.2.1. Consum de energie la un Centru de Date (sursa: Intel.com)

În teza sunt ilustrate diferite variante de configurații tip rețea electrică în Centre de Date de dimensiuni mici și medii.

Sunt standardizate (ANSI/BICSI 002-2011) 5 clase legate de nivelurile de fiabilitate ale infrastructurii electrice a Centrelor de Date.

ANSI/BICSI 002-2011, Clase

Clasa	Descriere (evaluare dpdv al sistemului electric)
F0	Centrul de date cu un singur traseu de distribuție, fără : sursa de putere alternativă, UPS, împământare IT corespunzătoare
F1	Centrul de date cu un singur traseu de distribuție
F2	Centrul de date cu un singur traseu de distribuție, cu componente redundante
F3	Centrul de date care poate fi întreținut și operabil concomitent
F4	Centrul de date tolerant la defecțiuni

2.2. Exemplu de alimentare cu energie a unui Centrului de Date Tier 3 cu includere echipamente de generare a energiei solare

Se prezintă o schemă proprie de alimentare cu energie electrică a unui Centru de Date Tier 3 de mai mici dimensiuni, cu montare în container, configurația cuprinzând și o alimentare de la surse fotovoltaice.

2.3. Aprecierea eficienței energetice a Centrului de Date

Eficiența energetică reprezintă o metodă de evaluare și de urmărire a consumului de energie electrică la un Centru de Date. Se folosește drept indicator :

$$PUE = \frac{\text{Energia totală consumată de la rețea}}{\text{Energia consumată de echipamentele IT instalate}} \quad (2.1)$$

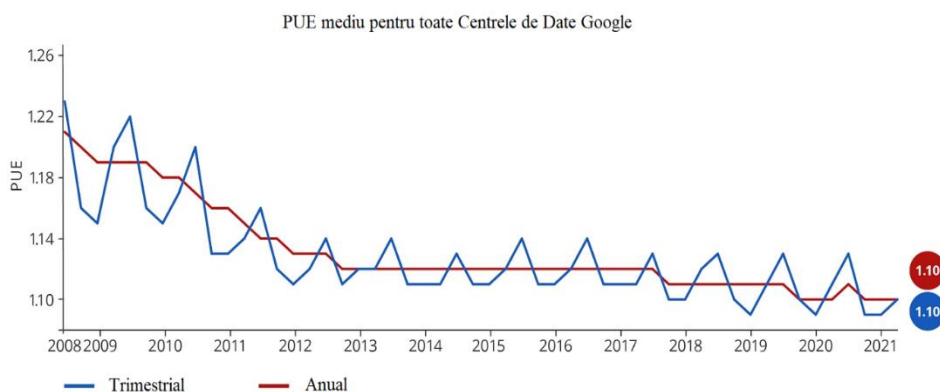


Fig.2.10 . PUE mediu Centre Date Google

Capitolul 3. Sistemul UPS și folosirea bateriilor

3.1. Structura unui sistem UPS

Soluția sursei neîntreruptibile de alimentare UPS (Uninterruptible Power Supplies) + baterie are rezultate bune din perspectiva costului și a fiabilității, fiind de preferat în realizarea unui Centru de Date. [28], [29].

CONTRIBUȚII PRIVIND POSIBILITATEA REUTILIZĂRII BATERIILOR
ÎN ALIMENTAREA ELECTRICĂ A CENTRELOR DE DATE

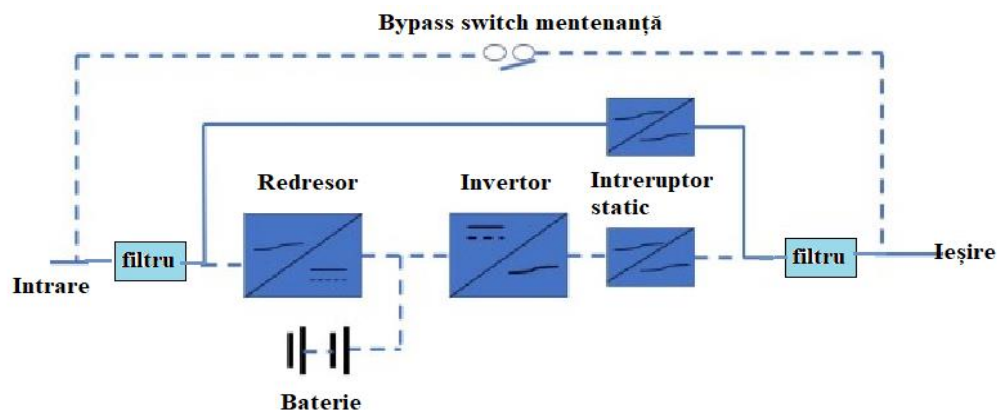


Fig. 3.1. Elemente componente sistem UPS [31]

În teză sunt prezentate diferite soluții pentru soluțiile UPS+ baterii în scheme specifice pentru diferite clase de Centre de Date. [31], [32].

3.2. Stocarea electrochimică a energiei electrice

Tablelul 3.1. Principalele tehnologii de baterii existente [34]

Tehnologia	Plumb-acid	Ni-Cd	Li-ion
Tensiune celula (V)	2	1.2	3~3.6
Wh/kg	25~35	40~50	100~600
Durata de viață (cicluri)	300	300~500	>500
Domeniu utilizare	Automobil IT, UPS, Stocare energie	Sector feroviar	Automobil electric, IT

3.2.1. Baterii Pb-acid

În sistemele actuale UPS+ baterie se folosesc preponderent baterii VRLA (Valve Regulated Lead Acid – Baterii cu valva reglatoare de presiune), fabricate și testate în conformitate cu standardul IEC SR EN 60896-21/22, celule de 2V, blocuri de 6V și 12V cu capacități cuprinse între 7 Ah și 3500 Ah.

3.2.2. Baterii pe bază de Litiu

CONTRIBUȚII PRIVIND POSIBILITATEA REUTILIZĂRII BATERIILOR
ÎN ALIMENTAREA ELECTRICĂ A CENTRELOR DE DATE

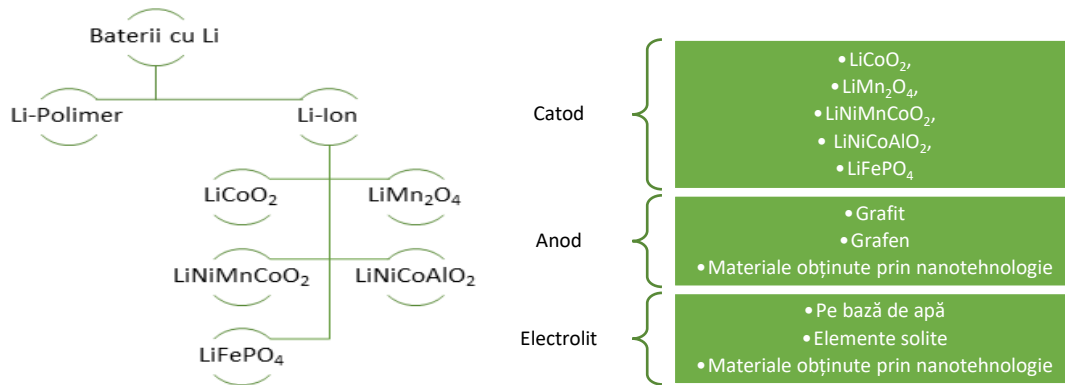


Fig.3.9. Baterii pe bază de Litiu

3.3. Parametrii funcționali ai bateriilor

Se prezintă parametrii funcționali ce trebuie luați în calcul în modelarea și optimizarea funcționării corecte a unei baterii.

3.3.1. Starea de încărcare

Starea de încărcare (SoC) se definește ca fiind raportul dintre capacitatea curentă a unei baterii $C(t)$ și capacitatea sa nominală C_n :

$$SoC = \frac{C(t)}{C_n} \quad (3.6)$$

Specificații	Parametrii
<input type="checkbox"/> capacitatea nominală,	<input type="checkbox"/> SoC,
<input type="checkbox"/> tensiunea nominală,	<input type="checkbox"/> OCV,
<input type="checkbox"/> densitatea de energie,	<input type="checkbox"/> SoH,
<input type="checkbox"/> densitatea de putere,	<input type="checkbox"/> Ri,
<input type="checkbox"/> autodescărcarea,	<input type="checkbox"/> capacitatea de polarizație,
<input type="checkbox"/> durata de viață.	<input type="checkbox"/> rezistența de polarizație.

Fig.3.11. Parametrii funcționali ai unei baterii electrice

Capacitatea nominală C_n , reprezintă sarcina maximă care poate fi stocată în baterie. Ea se exprimă în amperi-oră [Ah] și nu se modifică pe durata de viață a bateriei.

Capacitatea curentă a unei baterii se definește în operația de descărcare a baterii. Dacă bateria se consideră a fi încărcată total în momentul $t = 0$ și curentul de descărcare este $i(t)$, sarcina electrică descărcată este dată de relația (3.7):

$$C_d = \int_0^{t_d} i(t) dt \quad (3.7)$$

unde t_d este timpul de descărcare.

În aceste condiții:

$$SoC = 1 - \frac{\int_0^{t_d} i(t)dt}{C_n} \quad (3.8)$$

3.3.2. Tensiunea în circuit deschis (OCV)

Tensiunea de circuit deschis este tensiunea de la bornele unei baterii, la o anumită SoC și temperatură, în lipsa oricărui curent de descărcare sau încărcare.

Pentru cele mai multe tipuri de baterii tensiunea OCV are o dependență liniară raportată la SoC , conform relației:

$$OCV(t) = a_1 \cdot SoC(t) + a_0 \quad (3.9)$$

unde: $SoC(t)$ este valoarea instantanee a stării de încărcare a bateriei;

a_0 este valoarea tensiunii pentru $SoC = 0\%$;

a_1 valoarea tensiunii pentru $SoC = 100\%$.

3.3.3. Rezistența internă

Metoda cea mai utilizată pentru măsurarea rezistenței interne constă în determinarea diferenței apărute la valoarea tensiunii de la borne, la aplicarea unui curent de descărcare cunoscut I - Fig.3.14.

$$R_i = \frac{\Delta V}{I} \quad (3.10)$$

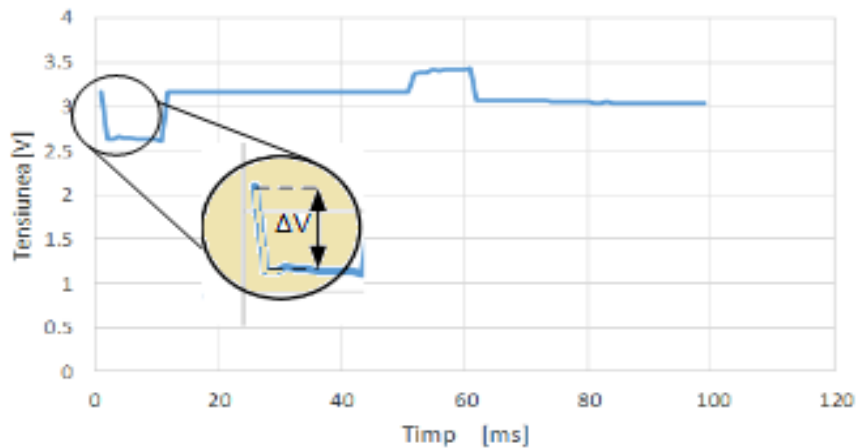


Fig.3.14. Determinare rezistență internă la baterie tip LiFePO4

3.3.4. Starea de sănătate (SoH)

Starea de sănătate (SoH) indică capacitatea bateriei de a furniza/primi energie la un anumit moment de timp, fiind definită prin prisma pierderii de capacitate:

$$SoH = \frac{C_{ef}}{C_n} \quad (3.11)$$

3.4. Testarea bateriilor pentru determinarea parametrilor

Parametrii bateriilor se determină prin metodele și procedurile indicate în: "USABC Test Procedures Manual" [46] și "PNGV Test Manual" [47].

- teste de bază: descărcarea la curent constant, determinarea vârfului de putere, descărcarea la putere constantă, performanța termică, descărcarea parțială;
- teste pentru determinarea duratei de viață a unei baterii: îmbătrânirea accelerată, simularea situațiilor reale, etc.

Se prezintă în teză aceste teste în detaliu.

3.5. Modelarea bateriilor

Modelul bateriei caracterizează, într-un algoritm software, comportamentul bateriei ca răspuns la diferite condiții externe și interne și poate fi utilizat apoi pentru a estima starea bateriei în orice moment.

Cele mai folosite metode de modelare sunt cele electrochimice, analitice, cele fundamentate pe analogia cu circuitele electrice și cele combinate [48]. În Fig.3.18 se prezintă pentru fiecare din aceste metode variantele cele mai studiate și recomandate.

Teza analizează metodologia de modelare urmată pentru fiecare tip de model.

3.6. Sisteme de management pentru baterii (BMS)

Sistemele de management (BMS) destinate bateriilor de diferite tipuri constructive urmăresc să asigure o verificare a parametrilor operaționali cheie în timpul încărcării și descărcării (tensiuni, curenți, temperatura internă și ambientală a bateriei) și să furnizeze semnale către dispozitivele de protecție în cazul în care oricare dintre parametrii ar fi în afara limitelor normale. Structura și funcțiile BMS-ului depind de aplicația în care este utilizată bateria respectivă.

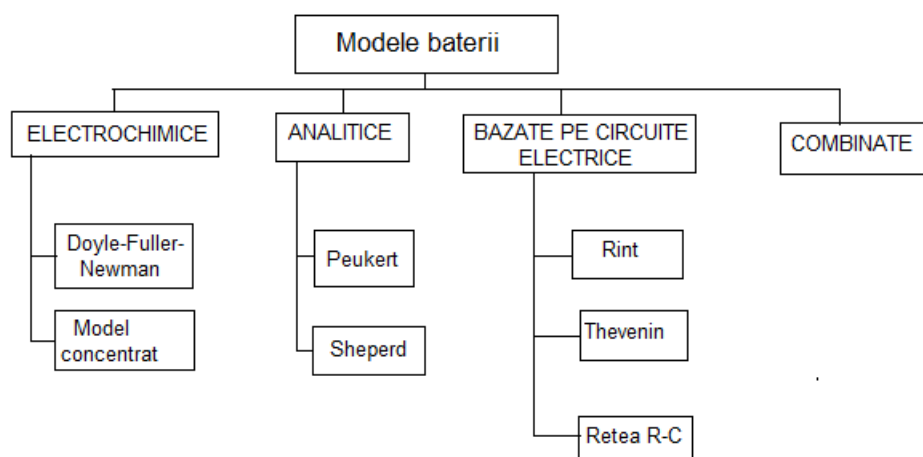


Fig.3.18. Modele baterie

Pentru a prelungi durata de funcționare și siguranța în exploatare a devenit treptat o practică să se implementeze dispozitive de echilibrare ca parte a sistemului de management al bateriei. Metodele actuale folosite pentru echilibrarea bateriilor sunt următoarele:

metode active

- energia este transferată între bateriile componente

metode pasive

- energia bateriilor supraîncărcate este disipată sub formă de căldură.

În teză se prezintă principalele metode de echilibrare pentru baterii.

Capitolul 4. Modelarea unui sistem UPS

Eu am optat pentru o analiză în domeniul timp pornind de la relațiile matematice ce descriu funcționarea fiecărei componente din sistemul UPS.

Am folosit ca date de intrare pentru modelul pe care l-am realizat pe cele obținute de la un UPS de tipul online model APC Smart-UPS 15000 VA, care alimentează un Centru de Date al unei firme cu 50 de angajați.

Parametrii acestui sistem sunt [90]:

- Tensiunea de alimentare – 230 V
- Frecvența de lucru – 50 Hz
- Puterea electrică debitată - 1500 VA/ 900 W
- Eficiența – 92%
- Timpul de anclanșare – 2 – 4 ms
- Baterie – VRLA, APCRBC155, tensiune 48V capacitate 9 Ah, la care se adaugă o baterie externă SRT48BP 48V, 18 Ah.
- Puterea de încărcare a bateriei – 108 W

Caracteristica de funcționare conform producătorului este prezentată în Fig. 4.1.

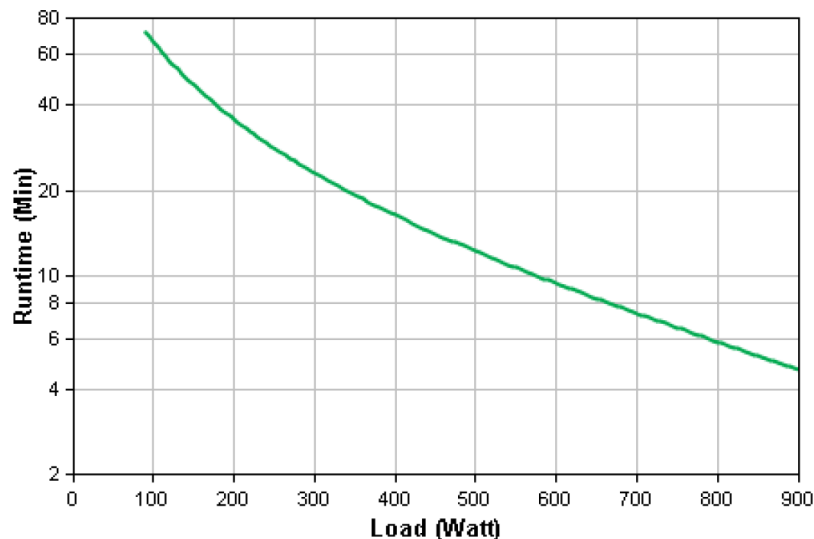


Fig.4.1. Caracteristica de descărcare a UPS supus modelării [90]

4.1. Schema bloc a sistemului UPS

Structura bloc a sistemului UPS analizat are ca punct de plecare schema generală de funcționare și se realizează cu pachetul software Matlab Simulink.– Fig. 4.2.

CONTRIBUȚII PRIVIND POSIBILITATEA REUTILIZĂRII BATERIILOR
ÎN ALIMENTAREA ELECTRICĂ A CENTRELOR DE DATE

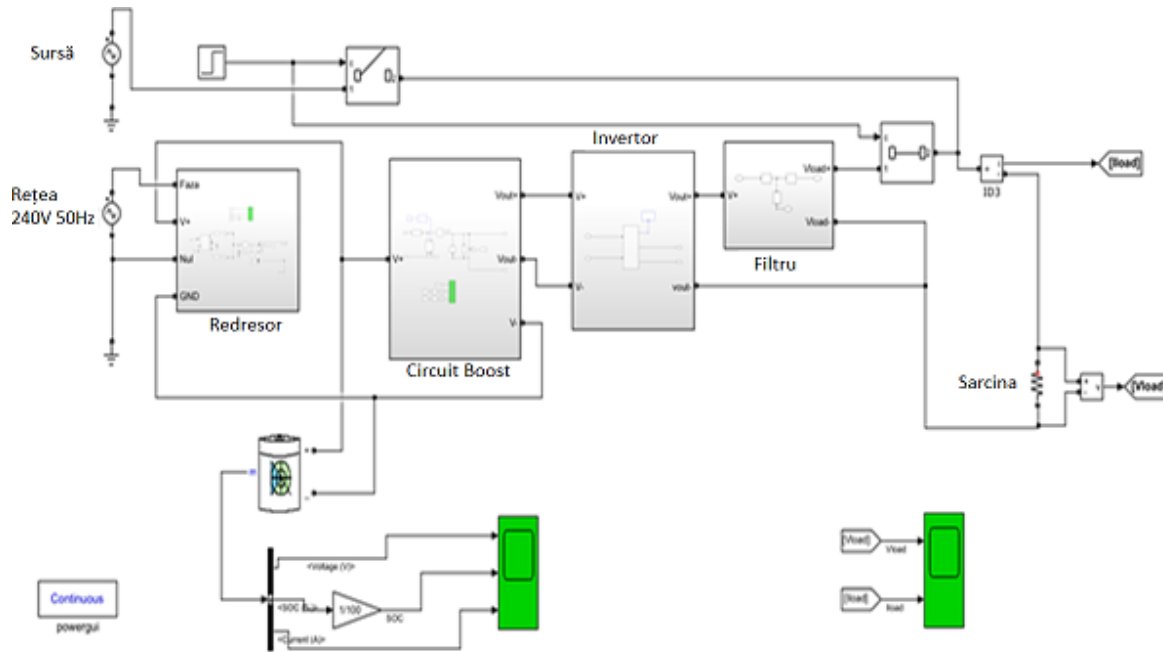


Fig.4.2. Modelul UPS realizat

Redresorul folosit în cadrul modelului UPS este un redresor bialternanță cu punct median cu următorul model – Fig. 4.4. Formele de undă ale tensiunilor și curenților obținute în urma rulării modelului sunt prezentate în Fig. 4.5.

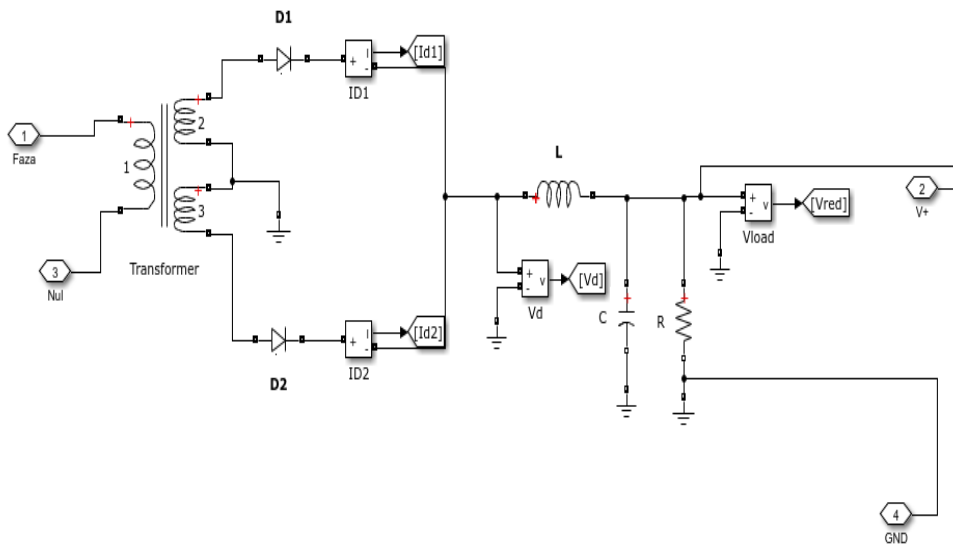
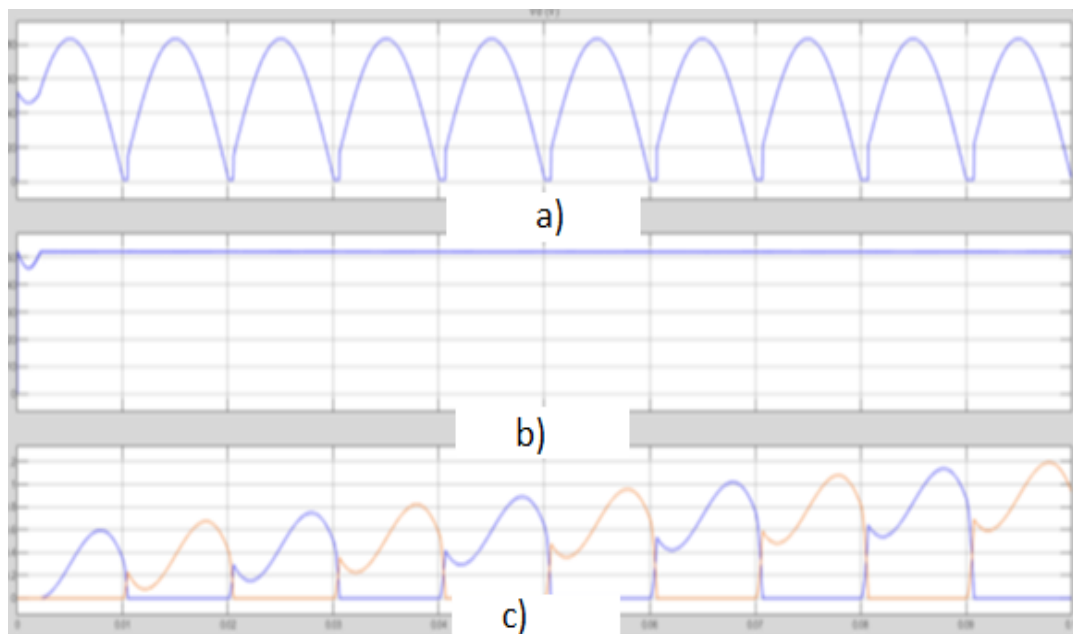


Fig.4.4. Redresor bialternanță cu punct median implementat

CONTRIBUȚII PRIVIND POSIBILITATEA REUTILIZĂRII BATERIILOR
ÎN ALIMENTAREA ELECTRICĂ A CENTRELOR DE DATE



a) Forma de undă a tensiunii redresate
b) Forma de undă la ieșire condensatorului de ieșire
c) Formele de undă ale curenților prin diodele D1 și D2

Fig.4.5. Funcționarea redresorului bialternanță cu punct median

Bancul de baterii folosit în cadrul modelului UPS este format din:

- 4 baterii Pb-acid VRLA 12V cu capacitatea nominală de 9 Ah conectate în serie.
- 1 baterie externă de 18 Ah compusă din 8 baterii VRLA configurație 2P4S.

Modelul bancului de baterii s-a realizat pe baza modelului generic de baterie Pb-acid implementat în cadrul programului Matlab care are ecuațiile de funcționare [79]:

- la descărcare:

$$U_{out} = E_0 - K \cdot \frac{Q}{Q-it} \cdot i^* - K \cdot \frac{Q}{Q-it} \cdot it + \mathcal{L}^{-1} \left(\frac{Exp(s)}{Sel(s)} \right) \quad (4.4)$$

- la încărcare

$$U_{out} = E_0 - K \cdot \frac{Q}{Q+it} \cdot i^* - K \cdot \frac{Q}{Q-it} \cdot it + \mathcal{L}^{-1} \left(\frac{Exp(s)}{Sel(s)} \cdot \frac{1}{s} \right) \quad (4.5)$$

S-a considerat că toate bateriile sunt identice și sunt de tipul VRLA 12 V cu capacitatea de 9Ah.

CONTRIBUȚII PRIVIND POSIBILITATEA REUTILIZĂRII BATERIILOR ÎN ALIMENTAREA ELECTRICĂ A CENTRELOR DE DATE

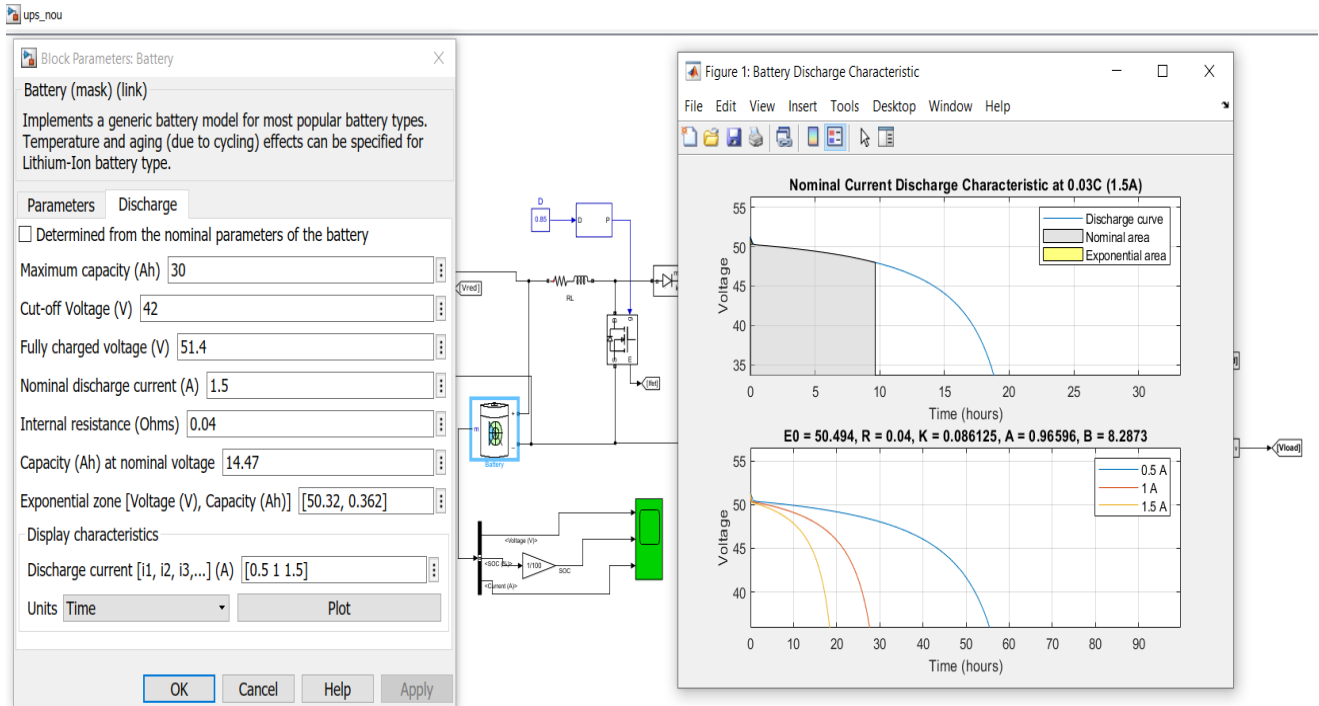


Fig.4.7. Modelarea bancului de baterii Pb-acid $U_n = 48V$, $Q = 27 Ah$

În urma rulării modelului bateriei, formele de undă sunt prezentate în Fig. 4.8 :

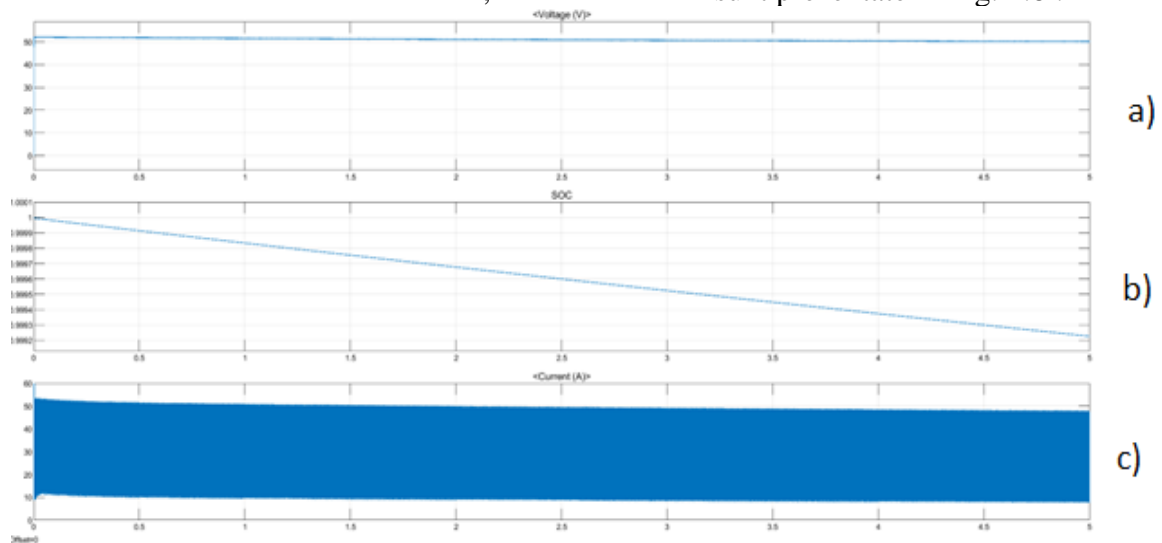


Fig.4.8. Evoluția parametrilor bancului de baterii la trecerea de la modul online la offline al UPS-ului

4.4. Circuitul Boost

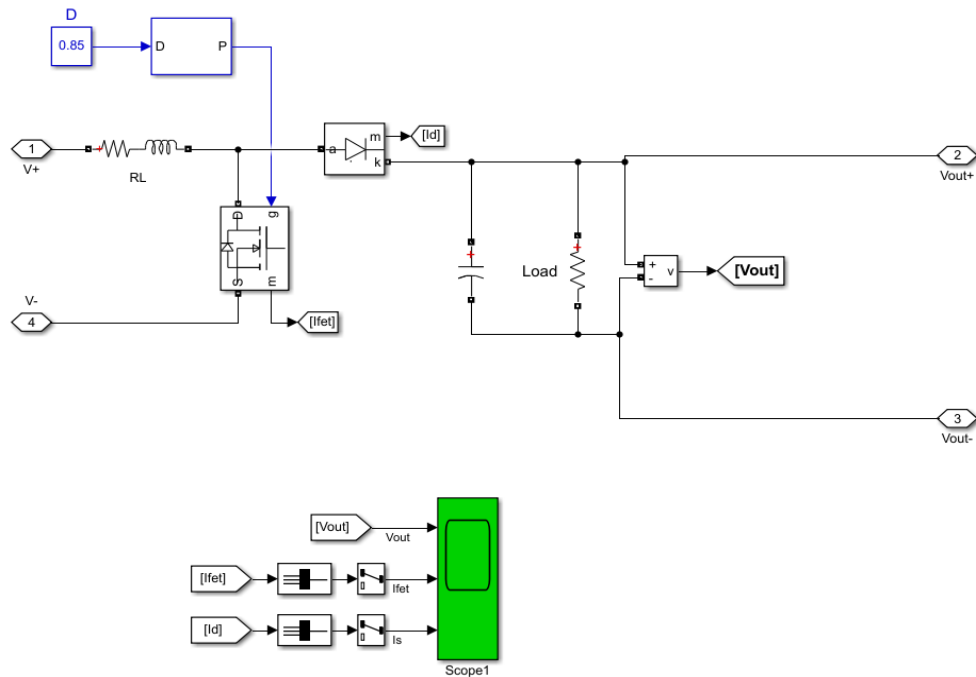
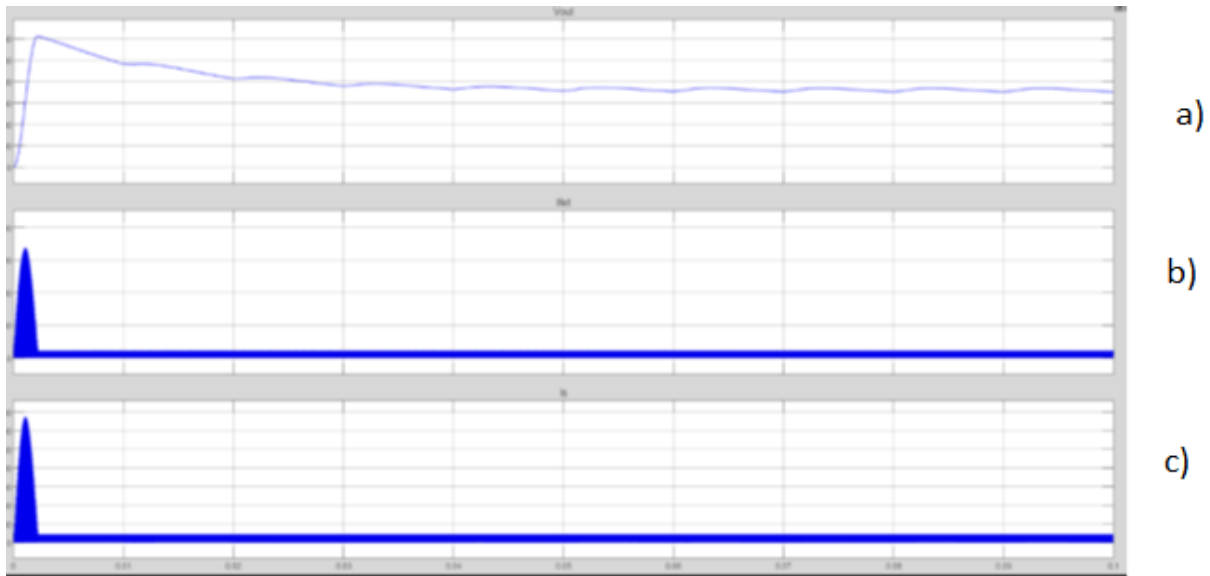


Fig.4.10. Convertorul Boost implementat



a) Tensiunea de ieșire
 b) Intensitatea curentului prin întrerupătorul MOSFET
 c) Intensitatea curenților prin diodă

Fig.4.11. Funcționarea convertorului Boost

4.5. Invertorul

Structura de la care s-a pornit realizarea acestui bloc este prezentată în Fig. 4.12. Invertorul este compus din 4 tranzistoare de tip MOSFET care formează brațele unei punții și care sunt comandate pentru a obține o tensiune alternativă de ieșire cu frecvența $f_o = \frac{1}{T_c}$

CONTRIBUȚII PRIVIND POSIBILITATEA REUTILIZĂRII BATERIILOR ÎN ALIMENTAREA ELECTRICĂ A CENTRELOR DE DATE

.Modelarea acestui bloc s-a realizat folosind blocul *Inverter* din cadrul bibliotecii *SimScope* cu configurația implicită – Fig. 4.13.

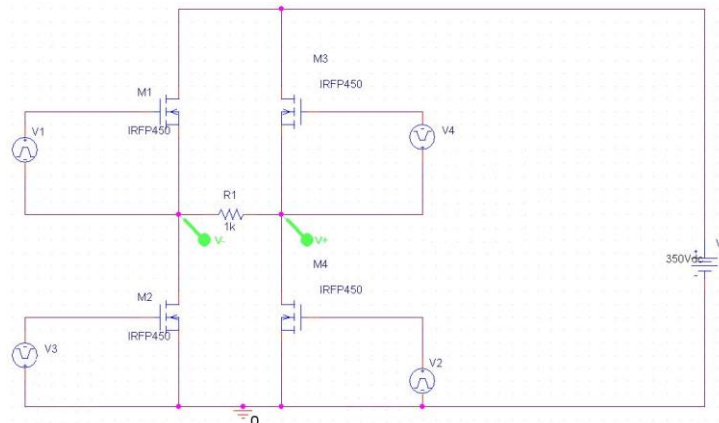


Fig.4.12. Invertor monofazat

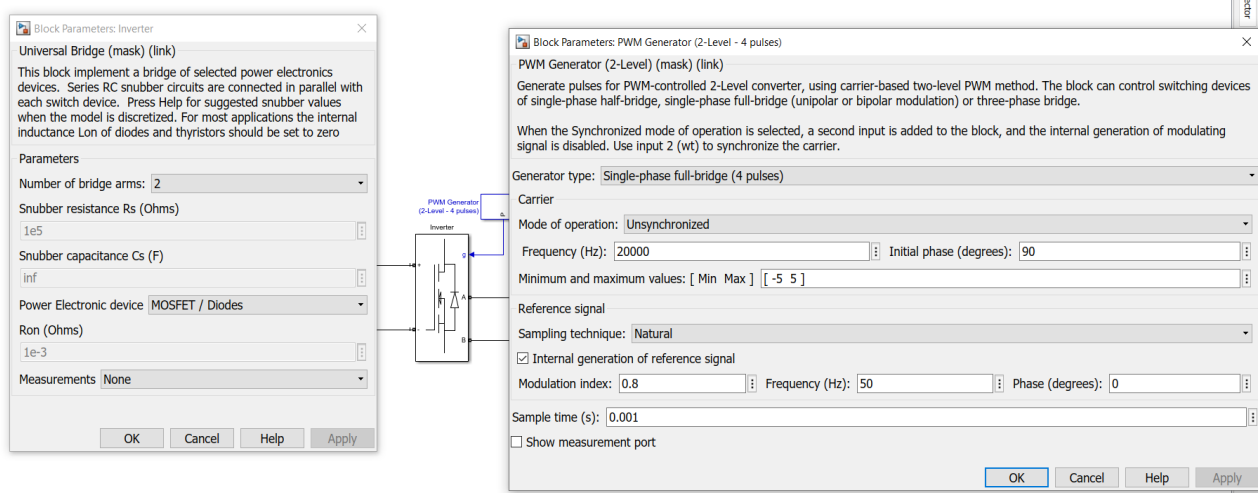


Fig.4.13. Configurarea invertorului implementat

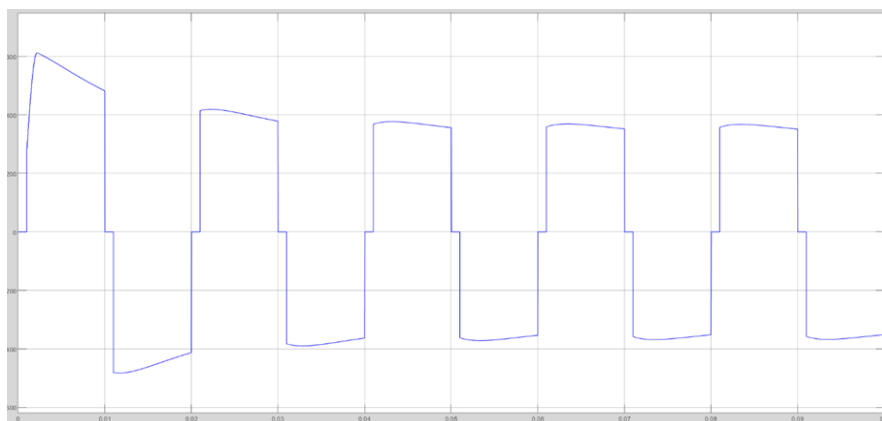


Fig.4.14. Tensiunea de la ieșirea invertorului monofazat

Pentru a aduce forma semnalului cât mai aproape de un semnal sinusoidal s-a prevăzut un filtru pasiv trece jos de tipul L-C-L.

CONTRIBUȚII PRIVIND POSIBILITATEA REUTILIZĂRII BATERIILOR
ÎN ALIMENTAREA ELECTRICĂ A CENTRELOR DE DATE

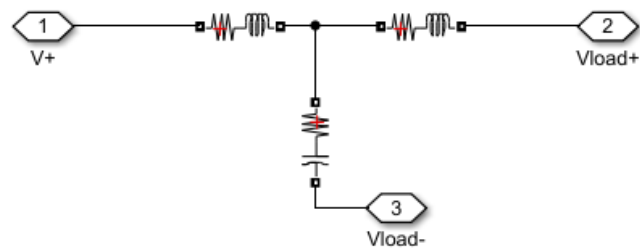
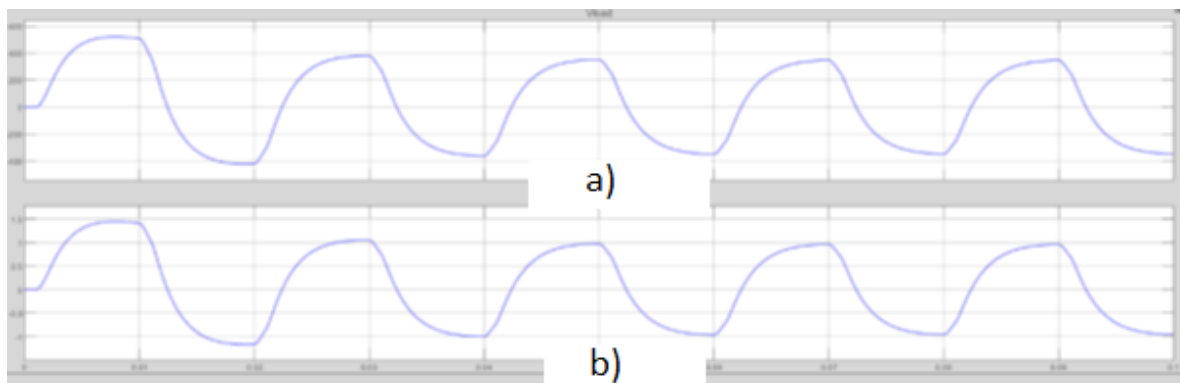


Fig.4.16. Filtru L-C-L implementat



a) Tensiunea de ieșire
b) Intensitatea curentului de ieșire

Fig.4.17. Funcționarea filtrului L-C-L

CAPITOLUL 5. Extinderea modelului bancului de baterii pentru a încorpora diferite tehnologii

5.1. Extinderea modelului pentru o baterie Pb-acid

Datele necesare pentru extinderea modelului au fost obținute de la o baterie Pb-acid VRLA 12 V 9 Ah, model FC12-9 folosită la aplicații staționare (UPS). Această baterie este similară cu cele folosite în cadrul UPS-ului studiat, ca performanțe, dar este produsă de o altă companie. Parametrii bateriei studiate sunt prezentați în Tabelul 5.1.

Tabel 5.1. Parametrii bateriei VRLA 12V 9Ah [92]

<i>Nr. Crt.</i>	<i>Parametru</i>	<i>Valoare</i>
1	Tensiunea nominală	12 V
2	Capacitatea nominală	9 Ah
3	Tensiunea minima admisibilă (descărcare)	10,50 V
4	Tensiunea maximă admisibilă (încărcare)	14,5 V
5	Curentul maxim încărcare	1,8 A
6	Curentul nominal descărcare	0,45 A

Ansamblu de testare – Fig. 5.2 cuprinde o sarcină electronică programabilă și software-ul necesar de comandă și înregistrare.

CONTRIBUȚII PRIVIND POSIBILITATEA REUTILIZĂRII BATERIILOR ÎN ALIMENTAREA ELECTRICĂ A CENTRELOR DE DATE



Fig.5.2. Ansamblu experimental folosit la efectuare testului de descărcare la curent constant

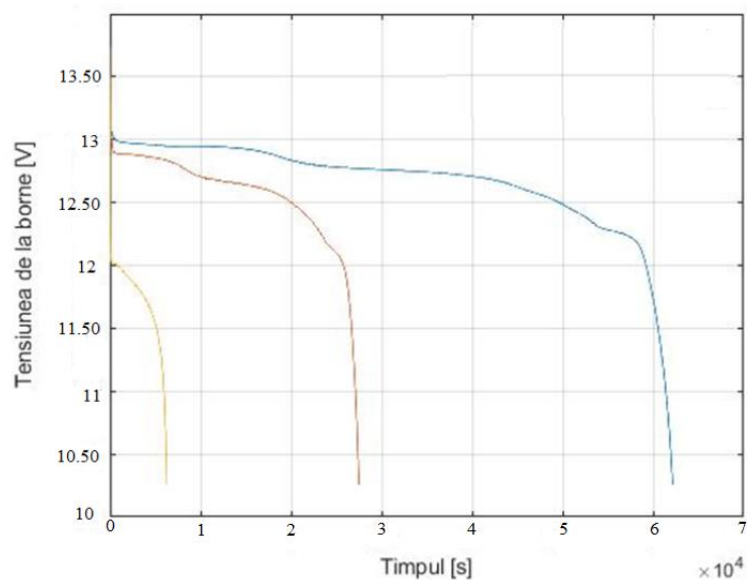


Fig.5.3. Ciclu 3 din secvența de testare privind descărcarea la curent constant

Configurația blocului de baterii este prezentată în Fig. 5.5. În urma rulării simulării evoluția *SoC* pentru 5 s este prezentată în Fig. 5.6. În acest interval *SoC* scade de la 100% la 99,86%, ceea ce înseamnă o viteză de descărcare de 1,56%/min, de unde rezultă că o scădere a capacității nominale de la 100% la 80% se va face în 11'58''.

5.2. Extinderea modelului pentru o baterie Li-Ion

Bateria Li-Ion considerată pentru a fi folosită drept sursă de alimentare pentru UPS, este de tipul LiCoO₂, produsă de compania SAMSUNG și care are un curent nominal de descărcare apropiat de cel al baterie VRLA. Principalii parametri de funcționare prezentați în Tabelul 5.2.

CONTRIBUȚII PRIVIND POSIBILITATEA REUTILIZĂRII BATERIILOR ÎN ALIMENTAREA ELECTRICĂ A CENTRELOR DE DATE

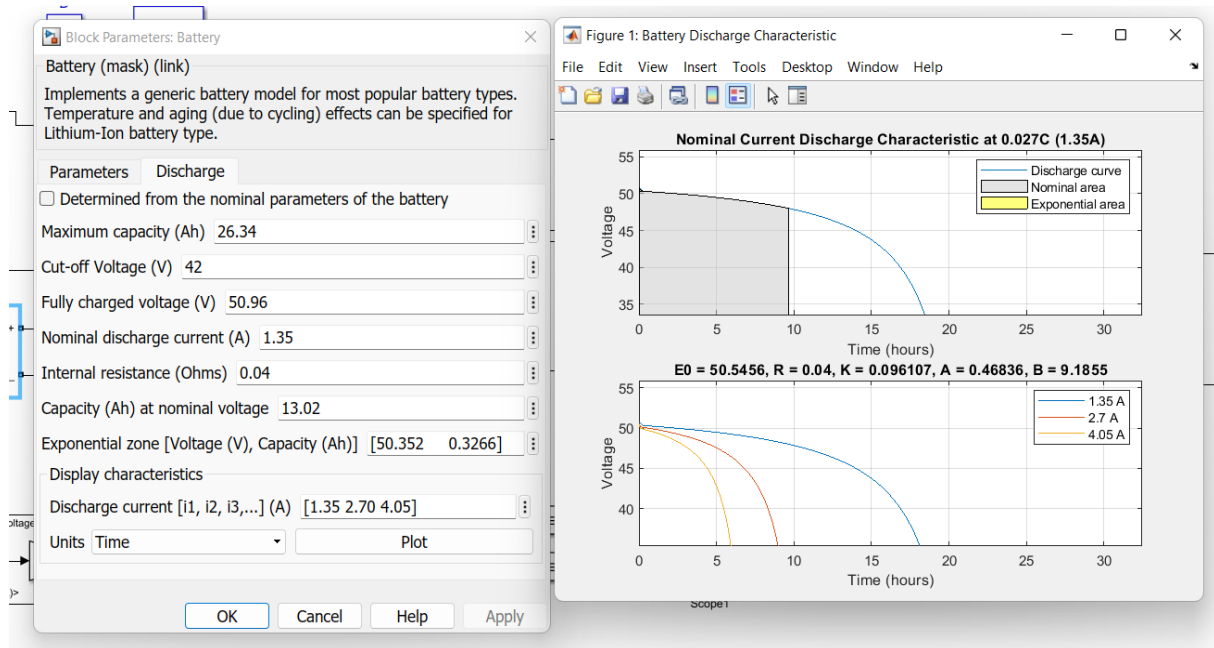


Fig.5.5. Configurația bateriei VRLA obținută din date măsurate

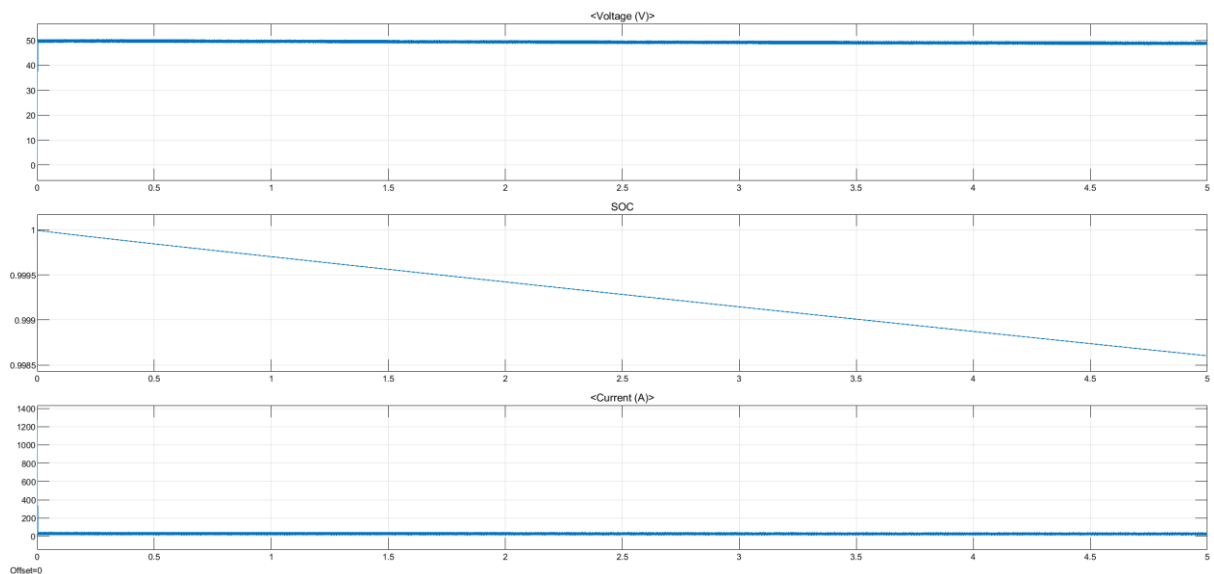


Fig.5.6. Evoluția SoC a bancului de baterii 4S3P VRLA

Tabel 5.2. Parametrii bateriei Li-Ion

<i>Nr. Crt.</i>	<i>Parametru</i>	<i>Valoare</i>
1	Tensiunea nominală	3,6 V
2	Capacitatea nominală	2,5 Ah
3	Tensiunea minima admisibilă (descărcare)	2,50 V
4	Tensiunea maximă admisibilă (încărcare)	4,2 V
5	Curentul maxim încărcare	1,25 A
6	Curentul nominal descărcare	0,5 A

CONTRIBUȚII PRIVIND POSIBILITATEA REUTILIZĂRII BATERIILOR
ÎN ALIMENTAREA ELECTRICĂ A CENTRELOR DE DATE

Au fost urmați aceiași pași de descărcare conform metodologiei USABC, rezultatele obținute fiind prezentate în Fig. 5.7.

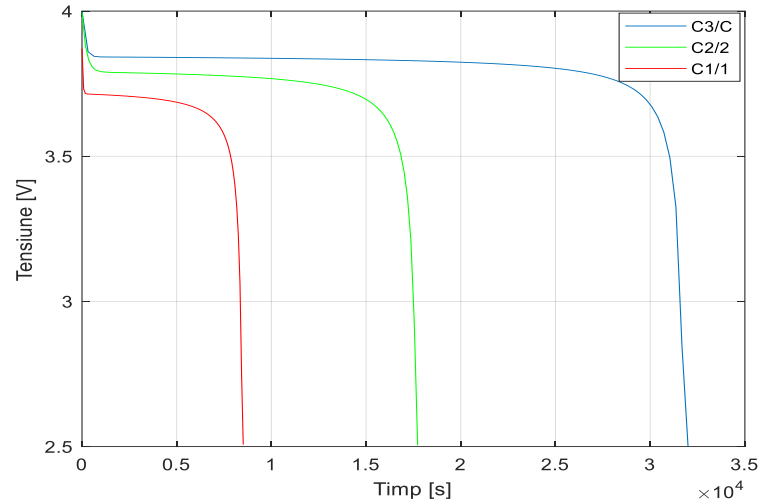


Fig.5.7. Ciclu 3 din secvența de testare privind descărcare la curent constant

Capacitatea efectivă a bateriei a fost calculată tot pe baza mediei aritmetice dintre cele trei capacități C3/3, ea fiind de 2,47 Ah.

În continuare s-a efectuat un test de descărcare folosind curentul nominal $I = 0,5 \text{ A}$ și din curba obținută s-au extras restul de parametri necesari modelului – Fig. 5.8.

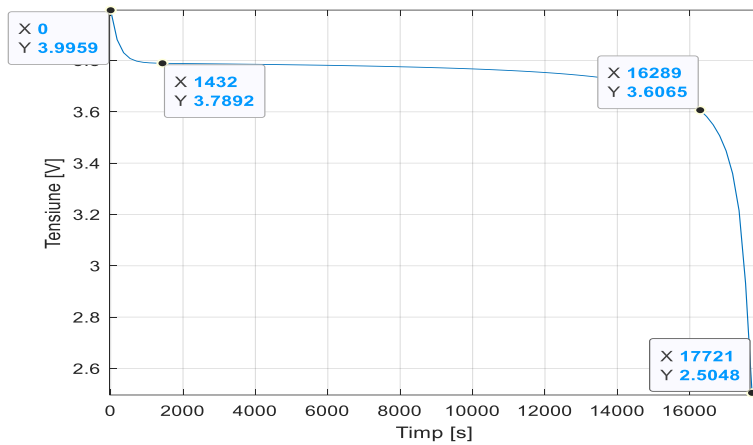


Fig.5.8. Descărcare la curentul nominal $I = 0,5 \text{ A}$ pentru determinarea coordonatelor necesare modelului

Considerând că toate bateriile sunt identice, prin extrapolare s-a propus o configurație cât mai apropiată de cea a bateriei VRLA și anume 13S11P. Configurația blocului de baterii este prezentată în Fig. 5.9

În urma rulării simulării evoluția SoC pentru 5 s este prezentată în Fig.5.10.

CONTRIBUȚII PRIVIND POSIBILITATEA REUTILIZĂRII BATERIILOR ÎN ALIMENTAREA ELECTRICĂ A CENTRELOR DE DATE

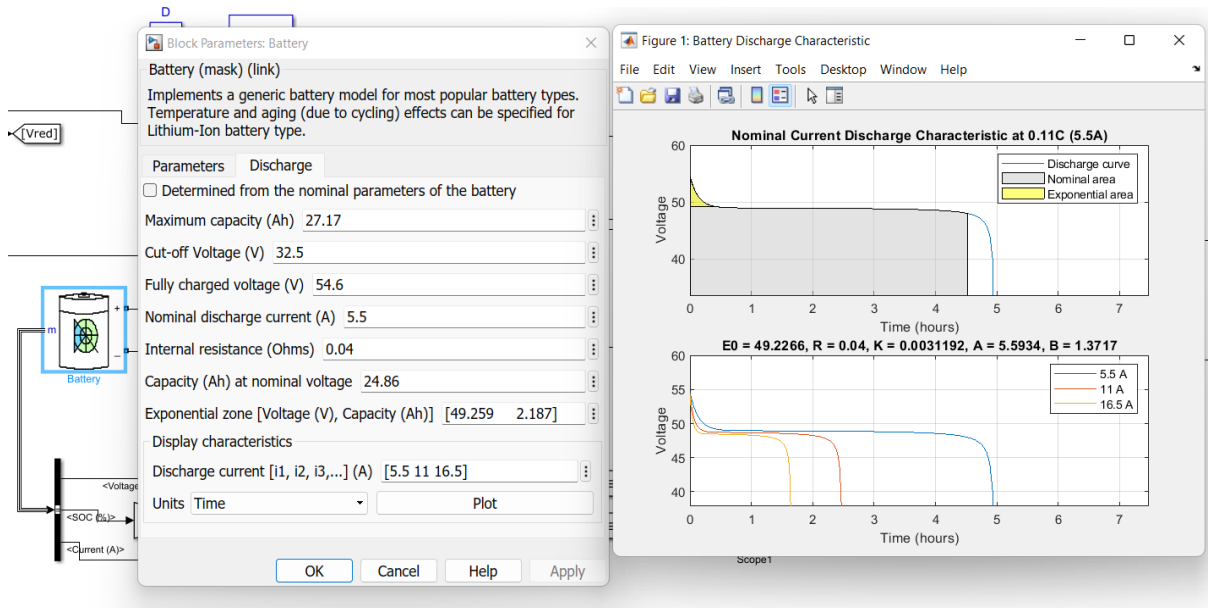


Fig.5.9. Configurația bateriei Li-Ion

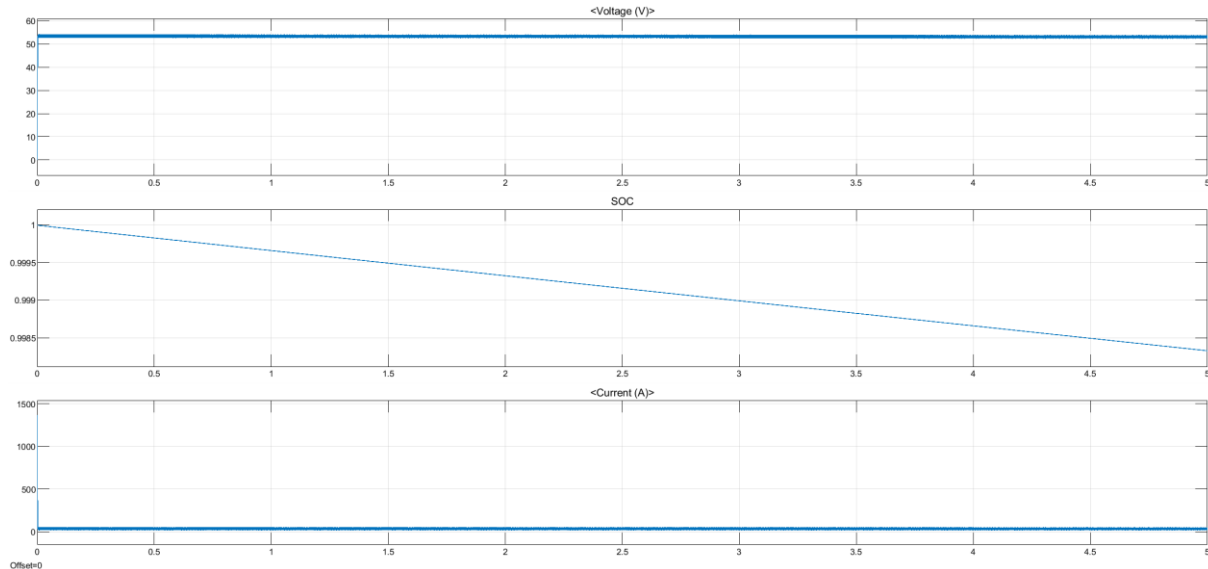


Fig.5.10. Evoluția SoC a bancului de baterii 13S11P Li-Ion

În acest interval SoC scade de la 100% la 99,84%, ceea ce înseamnă o viteză de descărcare de 1,92%/min, de unde rezultă că o scădere a capacitații nominale de la 100% la 80% se va face în 10'50''. Această primă estimare a capacitații este mai mică decât varianta de referință determinată, motiv pentru care se vor introduce încă 2 baterii în configurația paralel rezultând 13S13P. Noua configurație a bancului de baterii Li-Ion este cea din figura următoare.

Pentru această nouă configurație se obține o variația a SoC pentru un interval de 5 s între 100% și 99,86% - Fig. 5.13, similar cu cel al bateria VRLA.

CONTRIBUȚII PRIVIND POSIBILITATEA REUTILIZĂRII BATERIILOR ÎN ALIMENTAREA ELECTRICĂ A CENTRELOR DE DATE

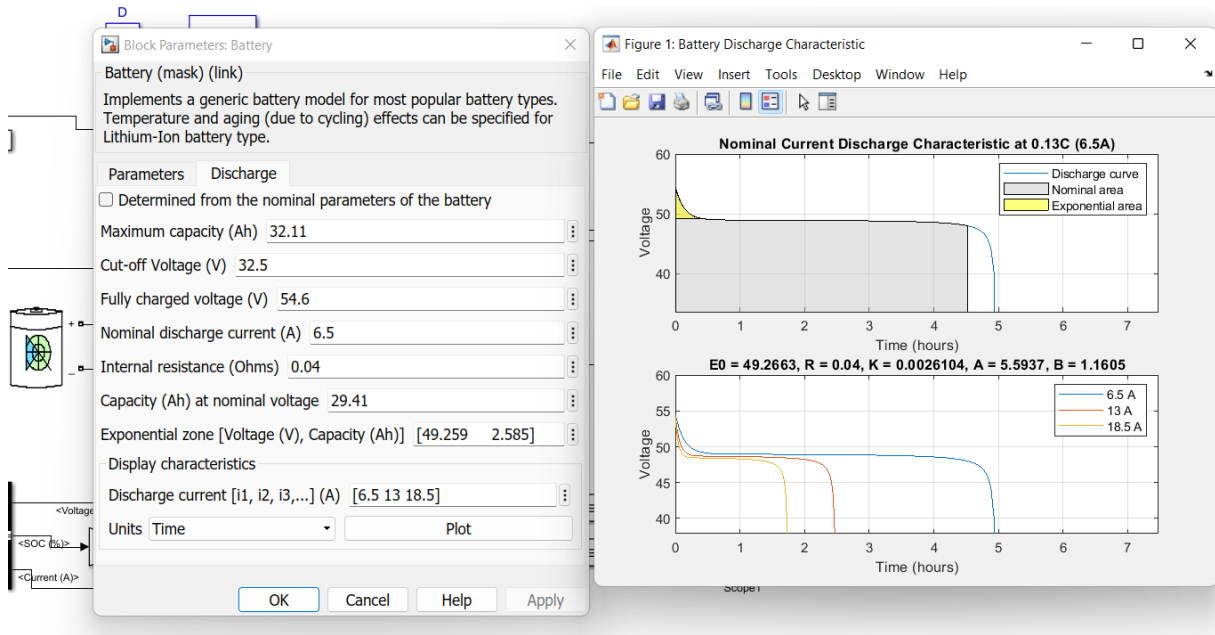


Fig.5.11. Noua configurație Li-Ion

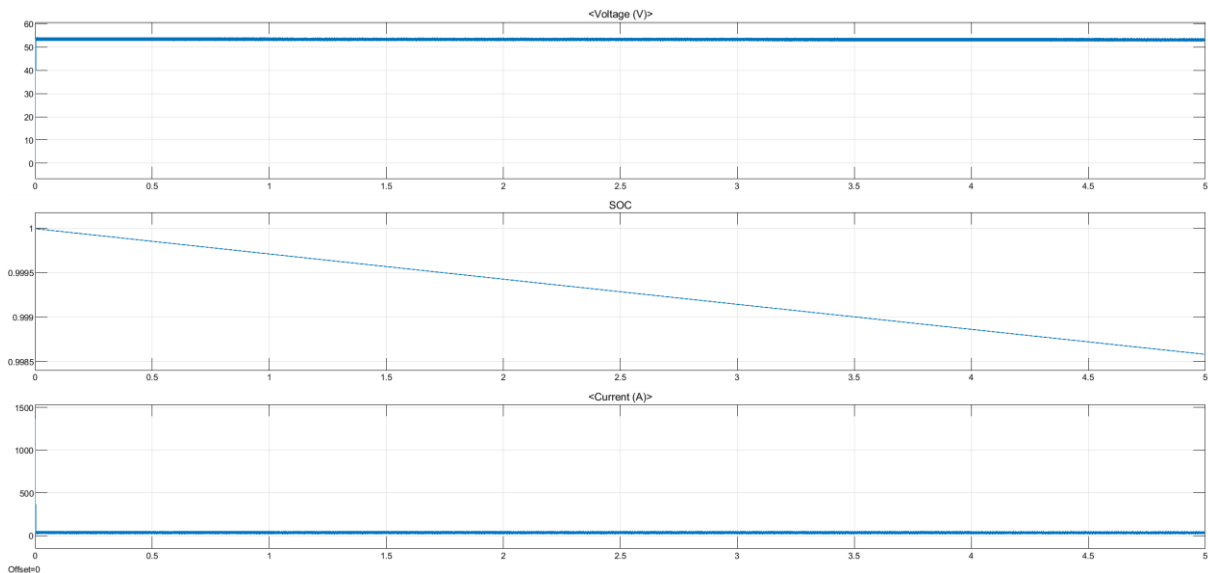


Fig. 5.12. Evoluția SoC a bancului de baterii 13S13P Li-Ion

Bateria Li-Ion care a fost folosită în studiu a fost una nouă. Acest lucru implică și un preț de cost ridicat pentru echiparea unui UPS, dar în contextul actual există și o altă soluție de alimentare pentru baterii Li-Ion, așa numitele baterii second-life.

5.3. Extinderea modelului pentru o baterie LiFePO₄ second-life

Pentru a studia comportarea unui UPS online echipat cu baterii second-life s-a pornit de o celulă nouă LiFePO₄ care a fost îmbătrânită artificial. Pentru aceasta s-a ales o celulă produsă de compania HETER care are parametrii înainte de îmbătrânire prezentați în Tabelul 5.3.

Tabel 5.3. Parametrii bateriei LiFePO₄ [94]

Nr. Crt.	Caracteristică	Valoare	U.M.
1	Capacitatea nominală	1400	mAh
2	Curentul nominal de descărcare	700	mA
3	Curentul maxim de încărcare	2100	mA
4	Curentul de vârf (<1s)	5600	mA
5	Tensiunea minima admisibilă	2.5	V
6	Tensiunea maximă admisibilă	3.6	V
7	Rezistența internă	60	mΩ

Înainte de îmbătrânirea celulei s-a aplicat secvența de testare USABC și s-a determinat capacitatea efectivă de 48 Ah.

Îmbătrânirea celulei s-a făcut folosind secvența de testare cunoscută sub denumirea de Random Walk ce presupune aplicarea unei succesiuni de curenți de încărcare și de descărcare, fiecare cu durata de 5 min, pornindu-se de la o baterie complet încărcată. Secvența de testare – Fig. 5.13, este formată din 12 pași pentru o oră, respectiv aproximativ 100 de pași (96 pași) pentru o zi (8 ore).

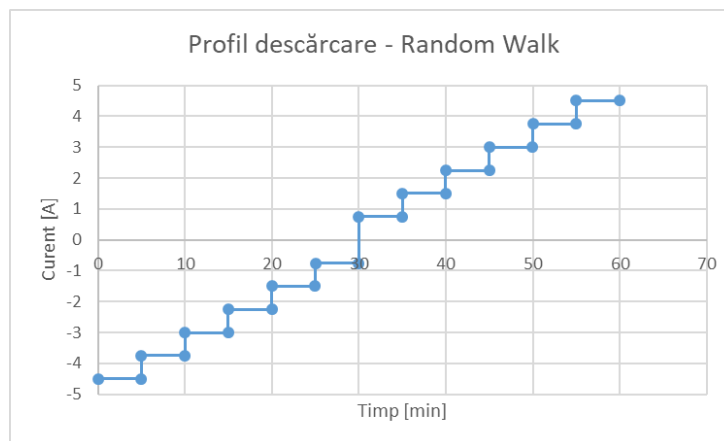


Fig. 5.13. Profil de descărcare Random Walk

După aplicarea a 500 de pași din secvența Random Walk s-a aplicat din nou metoda de testare USABC și noua capacitate efectivă a celulei a fost de 1,22 Ah, aproximativ 83% din capacitatea inițială. În aceste condiții se consideră că starea de sănătate a celulei (*SoH*) este 83%. Pentru această celulă îmbătrânită se vor considera următorii parametrii – Tabelul 5.4.

Tabel 5.4. Parametrii bateriei LiFePO₄ second-life

Nr. Crt.	Caracteristică	Valoare	U.M.
1	Capacitatea nominală	1,220	Ah
2	Curentul nominal de descărcare	0,610	A
3	Tensiunea nominală	3,2	V
3	Tensiunea minima admisibilă	2,5	V
4	Tensiunea maximă admisibilă	3,6	V

Pe baza testului de descărcare la curent constant $I = 0,61$ A s-a obținut curba de descărcare de pe care s-au extras restul de parametrii necesari modelului – Fig. 5.14.

CONTRIBUȚII PRIVIND POSIBILITATEA REUTILIZĂRII BATERIILOR ÎN ALIMENTAREA ELECTRICĂ A CENTRELOR DE DATE

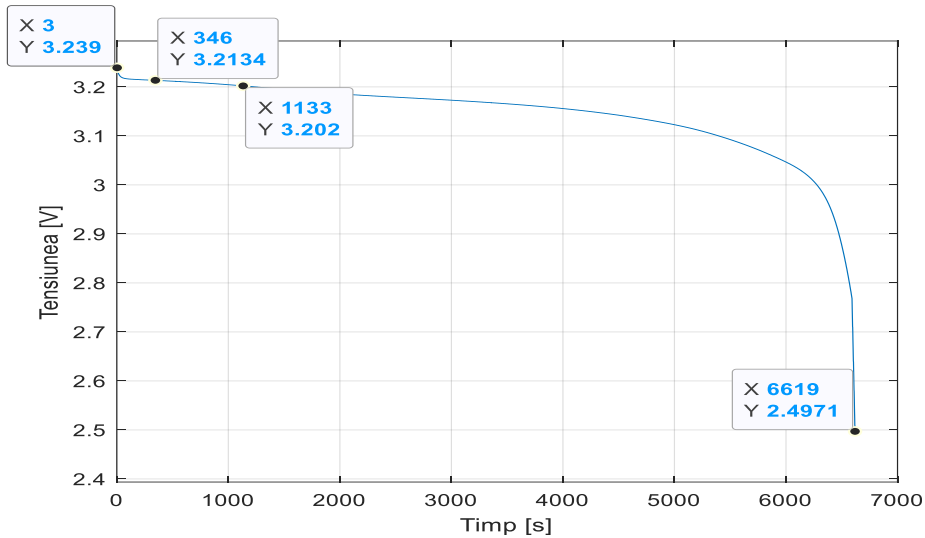


Fig.5.14. Descărcare la curentul nominal $I = 0,61$ A pentru determinarea coordonatelor necesare modelului

Considerând că toate bateriile sunt identice, prin extrapolare s-a propus o configurație cât mai apropiată de cea a bateria VRLA și anume 15S22P Configurația blocului de baterii este prezentată în Fig. 5.15.

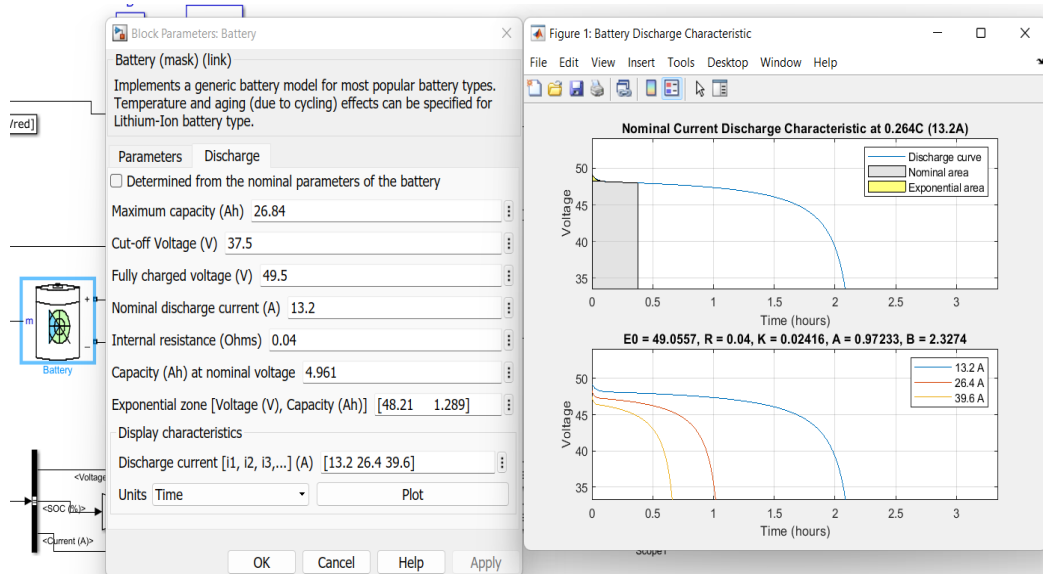


Fig.5.15. Configurația celulei LiFePO_4

În urma rulării simulării evoluția SoC pentru 5 s este prezentată în Fig. 5.16.

În acest interval SoC scade de la 100% la 99,87%, ceea ce înseamnă o viteză de descărcare de 1,56%/min, de unde rezultă că o scădere a capacitații nominale de la 100% la 80% se va face în 12'04''.

CONTRIBUȚII PRIVIND POSIBILITATEA REUTILIZĂRII BATERIILOR
ÎN ALIMENTAREA ELECTRICĂ A CENTRELOR DE DATE

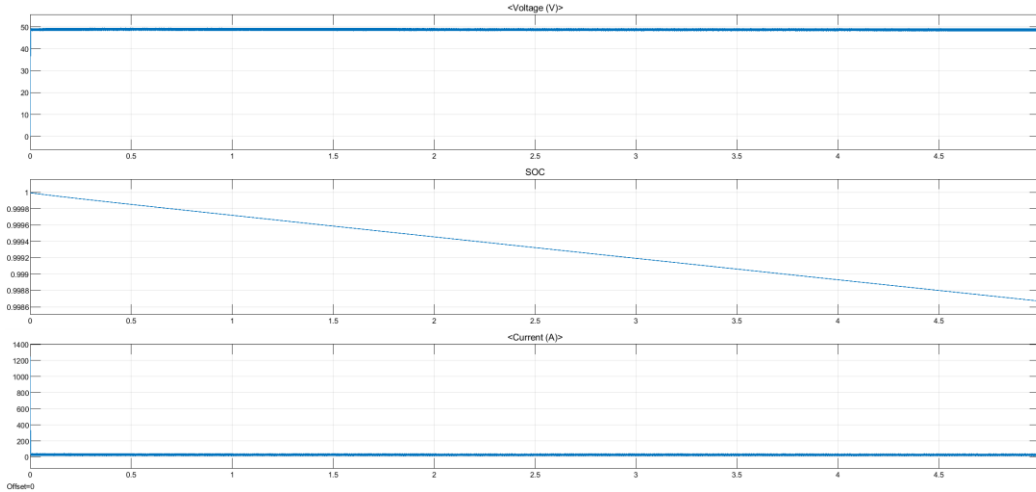


Fig.5.16. Evoluția SoC a bancului de baterii 15S22P LiFePO₄

Această primă estimare a capacității este mai mare decât varianta de referință determinată, motiv pentru care se va extrage o celulă din configurația paralel rezultând 15S21P. Noua configurație a bancului de baterii Li-Ion este:

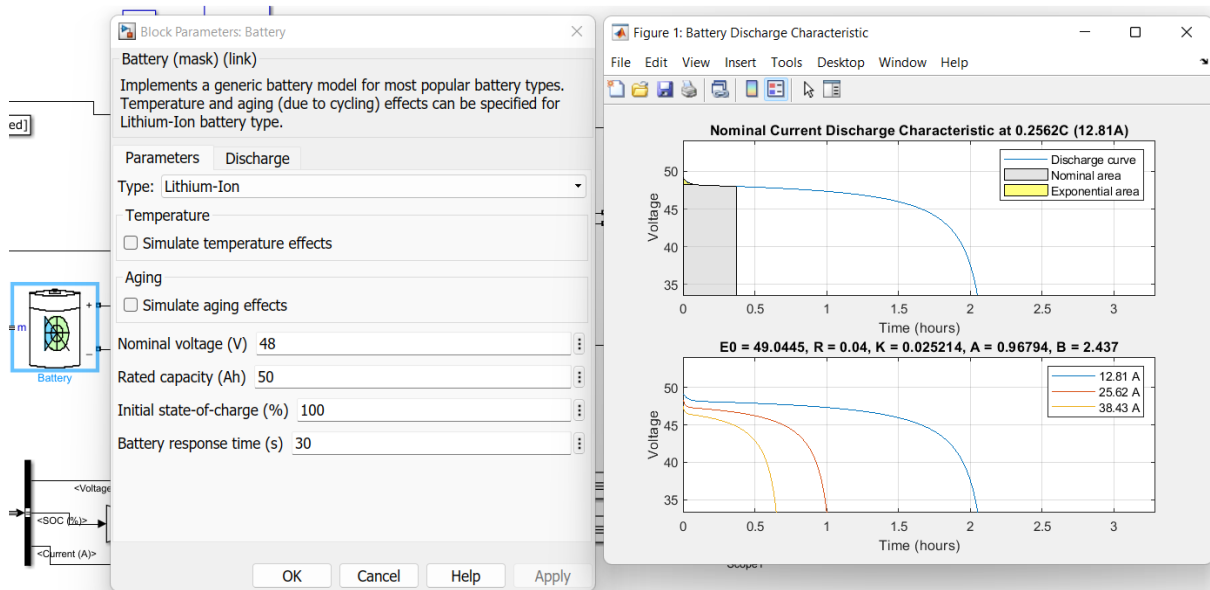


Fig.5.17. Noua configurație a celulei LiFePO₄

Pentru această nouă configurație se obține o variația a *SoC* pentru un interval de 5 s între 100% și 99,86% - Fig. 5.18, similar cu cel al bateria VRLA.

Bateria LiFePO₄ este caracterizată de o densitate mare de curent, ceea ce conduce la un număr mai redus de baterii decât cel teoretic chiar și în condițiile de reutilizare.

Rezultatele demonstrează că există soluții viabile de înlocuire a bateriilor cu Pb-acid care echipează UPS-urile din Centrele de date.

CONTRIBUȚII PRIVIND POSIBILITATEA REUTILIZĂRII BATERIILOR
ÎN ALIMENTAREA ELECTRICĂ A CENTRELOR DE DATE

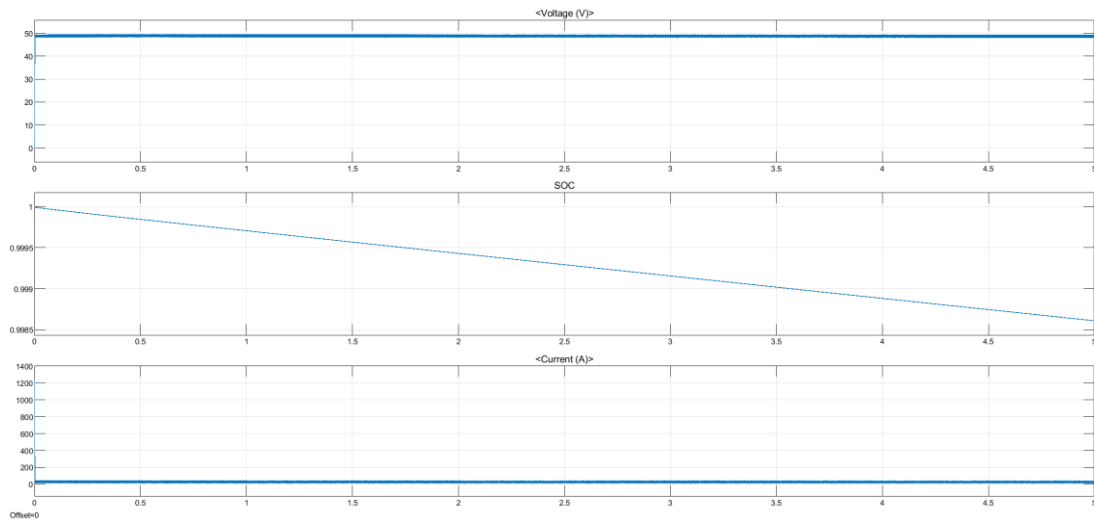


Fig. 5.18. Evoluția SoC a bancului de baterii 15S21P LiFePO₄

Capitolul 6. Proiectarea și realizarea unui sistem de determinare a stării de sănătate a unei baterii Pb-acid care echipează un UPS

Determinarea momentului optim de înlocuire se poate gândi în termeni economici, dar având întotdeauna la bază estimarea vârstei bateriei. Acest proces este cuantificat de starea de sănătate (State of Health – *SoH*) și depinde de capacitatea nominală a bateriei și capacitatea efectivă la un anumit moment de timp. Pentru că UPS-ul trebuie să asigure funcționarea neîntreruptă cu energie, o baterie se consideră că și-a atins limita de viață atunci când valoarea *SoH* scade sub 80% [38].

Pornind de la aceste premise s-au formulat specificațiile pe care trebuie să le îndeplinească sistemul propus pentru determinarea vârstei bateriei:

- Sistem minim invaziv care să nu perturbe funcționarea UPS-ului;
- Independent de informații istorice privind evoluția bateriei;
- Estimarea vârstei bateriei cu o eroare relativă sub 5%;
- Sistem cu complexitate scăzută și gabarit redus.

6.1. Metoda celor două impulsuri de descărcare

Aplicarea metodei de descărcare se face după următoarea metodologie:

1. Se decuplează bateria de la sarcină/sistem de încărcare pentru cel puțin 2 minute
2. După această perioadă, tensiunea de la bornele bateriei se consideră tensiunea de circuit deschis OCV
3. Se aplică secvența de testare din Fig. 6.1
4. Se măsoară valoarea căderii de tensiune ΔV_2 după al doilea impuls de descărcare
5. Se previzionează coeficientul curentului de descărcare nominal C_r conform relației

$$C_r = \delta \cdot (\Delta V_2) + \gamma,$$

unde δ și γ se obțin pe baza Fig. 6.2.

6. Se calculează starea de încărcare a bateriei cu relația

$$SoC = \frac{V_{max} + \beta - EMF_{min}}{\alpha},$$

unde V_{max} , EMF_{min} , β și α se determină pe baza datelor de descărcare furnizate de producătorul bateriei.

7. Se previzionează capacitatea efectivă maximă rămasă în baterie pe baza ecuației

$$C_{ef} = \frac{1}{C_r}$$

8. Se determină starea de sănătate a bateriei pe baza relației

$$SoH = \frac{C_{ef}}{C},$$

unde C este capacitatea nominală a bateriei conform datelor producătorului.

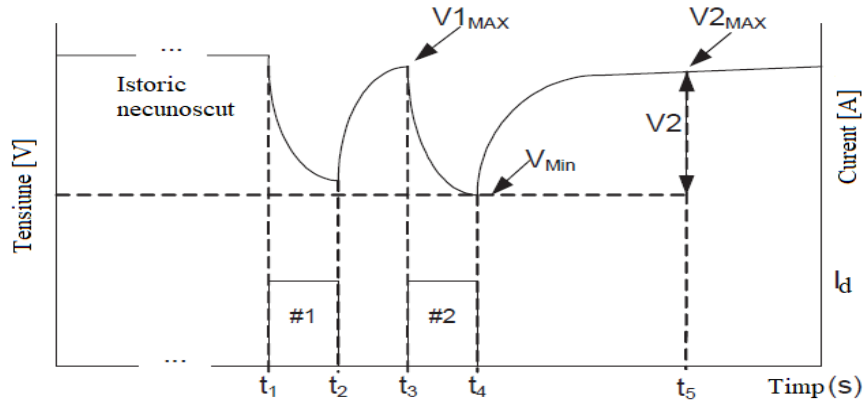


Fig. 6.1. Secvența de testare pentru metoda celor două impulsuri [94]

Tabel 6.2. Dependența dintre coeficientul curentului nominal de descărcare și curentul de descărcare [95]

Nr. Crt.	Curent de descărcare [A]	Coeficient al curentului de descărcare previzionat C_r
1	10	1,093
2	25	2,732
3	35	3,825
4	50	5,464
5	65	7,104
6	80	8,743

6.2. Structura hardware a sistemului propus

Schema de conexiuni a prototipului dezvoltat este cea din Fig. 6.3.

CONTRIBUȚII PRIVIND POSIBILITATEA REUTILIZĂRII BATERIILOR ÎN ALIMENTAREA ELECTRICĂ A CENTRELOR DE DATE

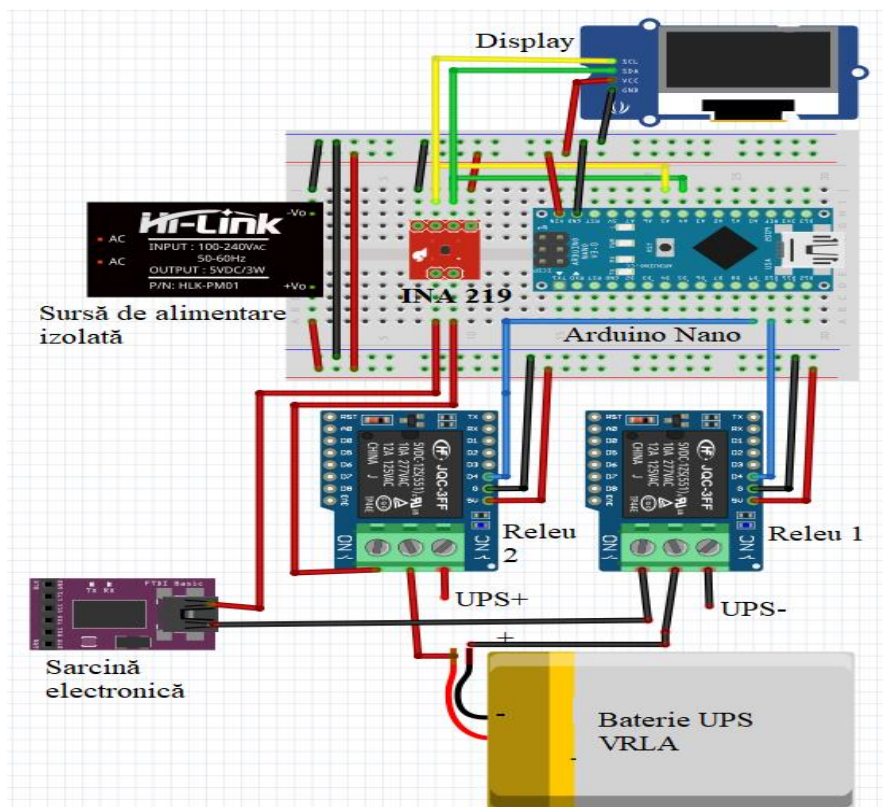


Fig. 6.3. Schema de conexiuni a prototipului dezvoltat

Elementul central al schemei este sarcina electronică care aplică bateriei VRLA cele două impulsuri de curent necesare obținerii tensiunilor ΔV_2 și V_{max} . Cuplarea sarcinii electronice se face prin intermediul contactelor normal deschise (ND) al celor două releu. Secvența de comandă este asigurată de unitatea Arduino Nano care, pe baza informațiilor de curent și tensiune provenite de la senzorul integrat INA219, stabilește momentul în care poate să fie aplicată secvența de testare. Această secvență constă în aplicarea a două impulsuri de curent cu valoarea de 1A pentru 18 secunde și înregistrarea tensiunilor la începutul și sfârșitul fiecărui impuls.

Schema este completată de sursa de alimentare izolată care se conectează la rețea și furnizează o tensiune continuă de 5 V pentru funcționarea prototipului asigurând, în același timp și izolarea galvanică.

Datele privind mărimile înregistrate și cele estimate, SoC și SoH sunt afișate pe un ecran OLED color.

Sarcina electronică utilizată a fost dezvoltată pentru testarea porturilor USB și are în componența ei un MOSFET IRFZ44 cu un domeniu de lucru între 3,7V și 13 V. Acesta este comandat prin intermediul unui amplificator operațional LM324 care are pe intrarea inversoare un potențiometrul ce permite reglarea curentului în domeniul 0,15A...3 A. Sarcina este completată de un circuit de măsurarea a temperaturii pe MOSFET și un sistem de răcire activ care intervine atunci când puterea disipată atinge valoarea prag de 13 W. Pentru păstrarea funcționării sarcinii în aceste limite s-a stabilit curentul de descărcare la valoarea de 1A pentru toate testele.

Circuitul de măsurare este bazat pe circuitul integrat INA 219 care permite măsurarea concomitentă a tensiunii în domeniul 0 ... 26 V_{DC} și a curentului în domeniul 0... 3,2 A. Pentru aceasta se folosește un amplificator operațional în configurație diferențială care măsoară

căderea de tensiune de pe un rezistor de șunt cu valoarea de 10Ω . Tensiunile măsurate sunt convertite de un CAD de 16 biți și transmise pe interfața I2C la sistemul de comandă.

Unitatea de comandă este din familia Arduino (Nano) și se bazează pe un procesor Atmega328 cu arhitectura de tipul AVR care asigură o frecvență de procesare de 16 MHz și 32 kB memorie de program. De asemenea, dispune de interfețe de comunicație I2C, SPI, serială și USB. Datele sunt afișate pe un ecran cu rezoluție de 128x64 px color tehnologie OLED, cu diagonala de 0.96". Luminozitatea și contrastul foarte înalt sunt reglabile prin controlerul încorporat, iar comunicația se face pe interfața SPI. Consumul de energie este foarte redus de 0.08 W.

6.3. Structura software a sistemului propus

Structura software a fost dezvoltată în conformitate cu metodologia de testare și cu structura hardware dezvoltată. Organigrama codului sursă este prezentată în Fig. 6.4.

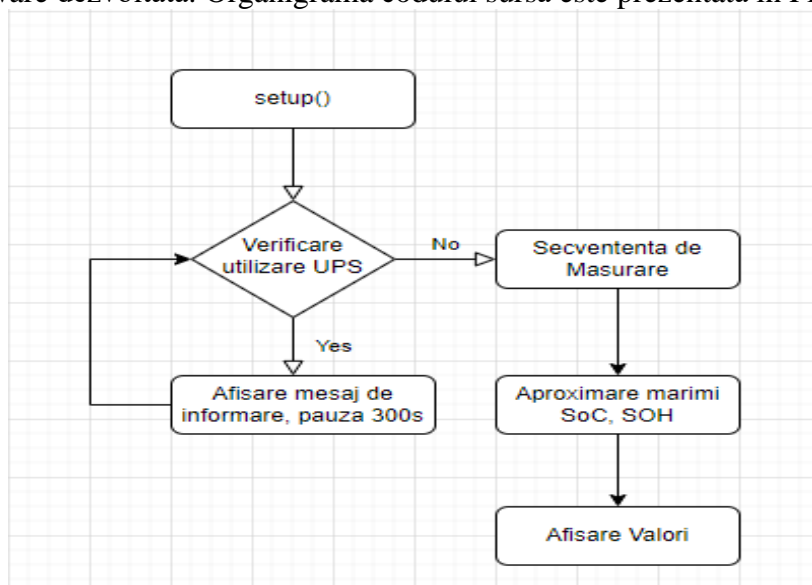


Fig. 6.4. Organigrama codului sursă

Pe lângă funcțiile dezvoltate au fost folosite și o serie de biblioteci pentru a comunica cu elementele hardware ale schemei:

- <Wire.h> - biblioteka de comunicație I2C utilizată de senzorul integrat INA219
- <Adafruit_INA219.h> - biblioteka de prelucrare a informațiilor provenite de la senzorul INA219
- <SPI.h> - biblioteka de comunicație SPI utilizată de ecranul OLED
- <Adafruit_GFX.h> - bibliotecă folosită pentru afișarea mesajelor pe ecran
- <Adafruit_SSD1306.h> - biblioteka folosită drept driver de dispozitiv

Secvența de cod folosită de funcția *setup()* are rolul de a inițializa comunicația cu sistemele periferice și de a stabili pinii de intrare și de ieșire folosiți.

Codul sursă dezvoltat pentru aceasta funcție este prezentat în teză:

6.4. Calibrarea sistemului de determinare a SoC și SoH dezvoltat

Calibrarea sistemului de determinare a SoC și SoH s-a făcut folosind structura de testare din Fig. 6.5 și datele experimentale obținute. Structura aleasă folosește în locul unei baterii VRLA o sursă de tensiune programabilă care poate să reproducă, pe durată celor două impulsuri de 18 secunde, căderea de tensiune de la bornele unei baterii supuse la test.

CONTRIBUȚII PRIVIND POSIBILITATEA REUTILIZĂRII BATERIILOR ÎN ALIMENTAREA ELECTRICĂ A CENTRELOR DE DATE

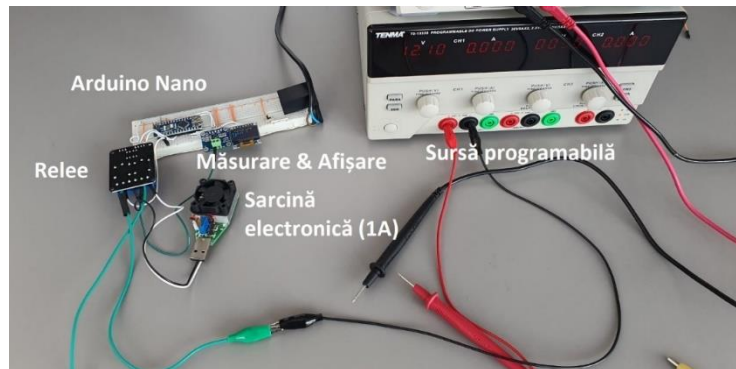


Fig. 6.5. Structura folosită pentru calibrare

Datele experimentale folosite sunt prezentate în Fig. 6.6 și reprezintă variația de tensiune ΔV_2 funcție de C_{rate} . Deoarece, în cadrul testelor efectuate în [81] s-a utilizat un curent de descărcare de 10 A, care nu poate să fie atins de sistemul dezvoltat, pe baza datelor din Tabelul 6.2 s-a extrapolat valoarea pentru C_{rate} corespunzătoare unui curent de descărcare de 1A, obținându-se $C_{rate} = 0,1093 \text{ Ah}$.

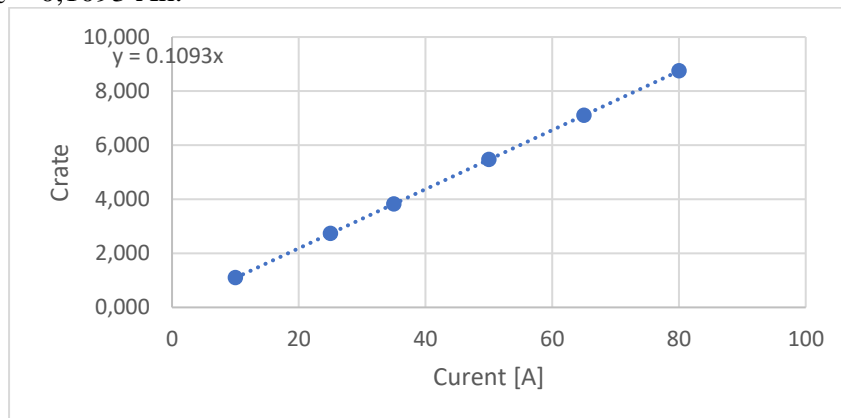


Fig. 6.6. Evoluția C_{rate} funcție de curentul de descărcare – reprezentarea datelor din tabelul 6.2.

Pentru o variație $\Delta V_2 = 0,07 \text{ V}$, bateria VRLA testată în [83] avea o capacitate nominală de 183 Ah, și un SoC = 80%, respectiv SoH = 80%. Valorile obținute pe cale experimentală se încadrează într-o eroare relativă maximă de 2% pentru SoC, respectiv 0,5% pentru SoH. Acestea validează valoarea extrapolată pentru C_{rate} și fac sistemul pregătit pentru testarea bateriilor VRLA.

CONTRIBUȚII PRIVIND POSIBILITATEA REUTILIZĂRII BATERIILOR
ÎN ALIMENTAREA ELECTRICĂ A CENTRELOR DE DATE

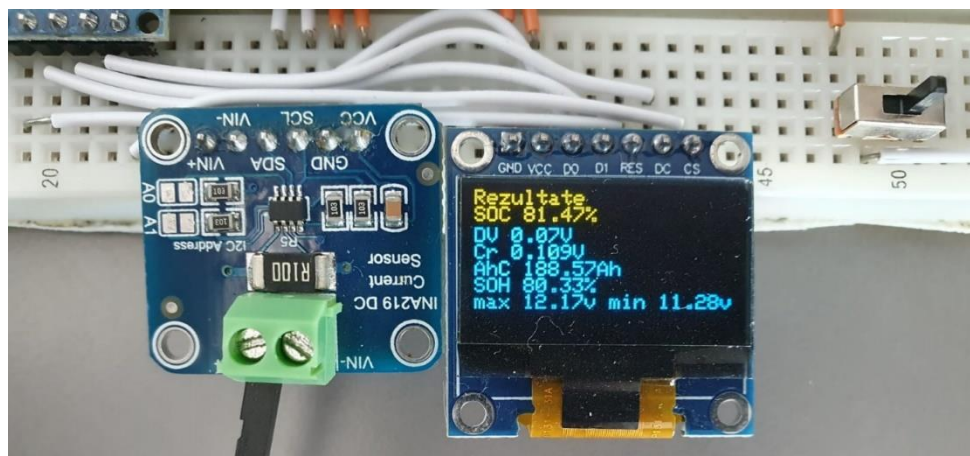


Fig. 6.7. Rezultatele calibrării sistemului

6.5. Rezultate experimentale la determinarea a SoC și SoH a bateriilor care echipează UPS-uri

Forma finală a prototipului dezvoltat este prezentată în Fig. 6.8. Acesta respectă schema dezvoltată în cadrul procesului de proiectare și cuprinde tot codul sursă prezentat.

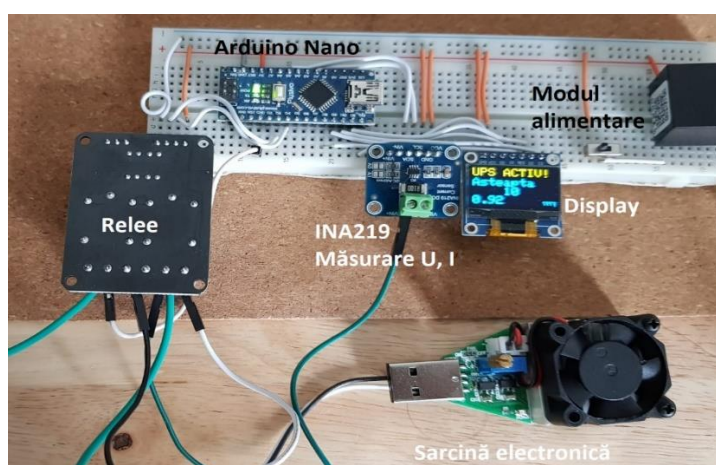


Fig. 6.8. Prototipul dezvoltat

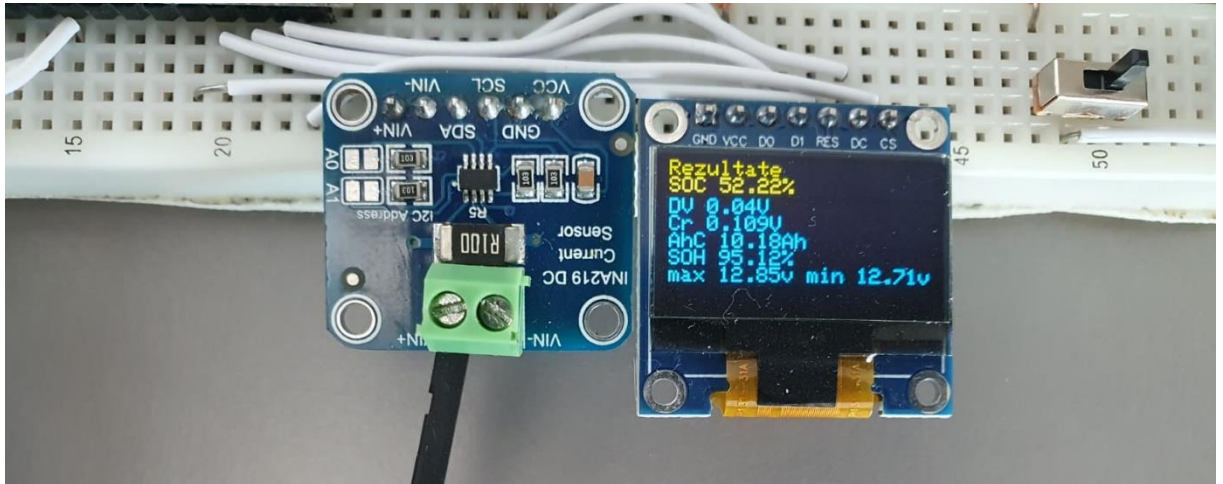
Datele celor trei baterii sunt sintetizate în Tabelul 6.3.

Tabel 6.3. Starea bateriilor supuse la testare

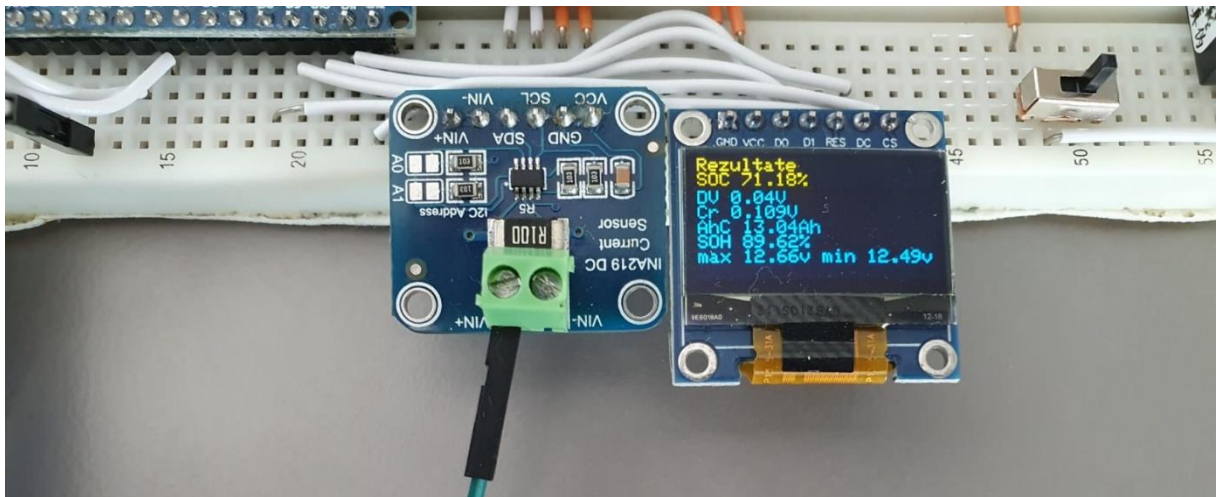
Nr. Crt.	Capacitate nominală [Ah]	Starea de sănătate <i>SoH</i> [%]
1	9	92
2	12	86
3	14	81

Pentru cele trei baterii au fost obținute următoarele valori:

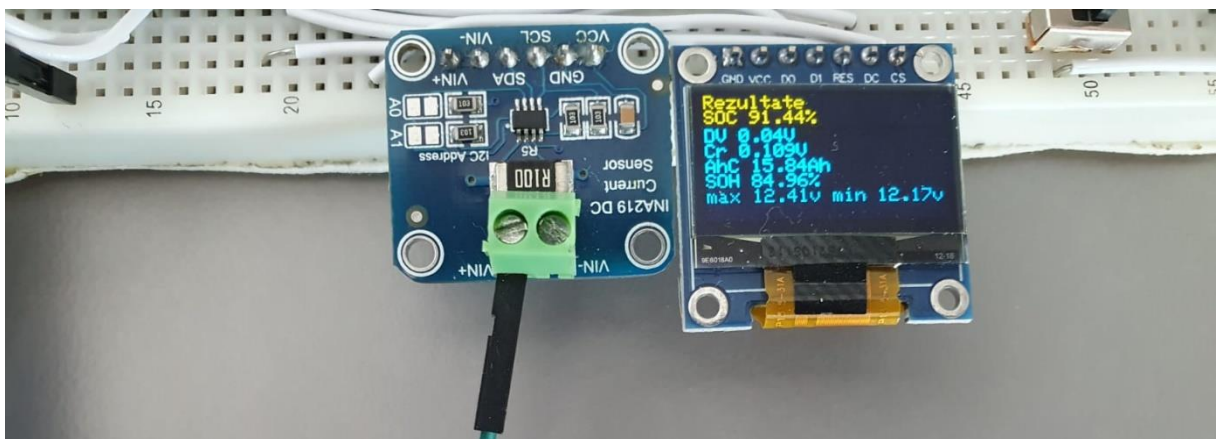
CONTRIBUȚII PRIVIND POSIBILITATEA REUTILIZĂRII BATERIILOR
ÎN ALIMENTAREA ELECTRICĂ A CENTRELOR DE DATE



a) Bateria 1 – 9Ah, $SoC = 60\%$, $SoH = 92\%$



b) Bateria 2 – 12Ah, $SoC = 75\%$, $SoH = 86\%$



c) Bateria 3 – 14Ah, $SoC = 90\%$, $SoH = 81\%$

Fig. 6.9. Rezultate experimentale obținute la testarea celor trei baterii VRLA

Erorile absolute și erorile relative pentru determinare SoC și SoH sunt prezentate în Tabelul 6.4.

Tabel 6.4. Evaluarea acurateții sistemului de estimare a SoC și SoH

CONTRIBUȚII PRIVIND POSIBILITATEA REUTILIZĂRII BATERIILOR
ÎN ALIMENTAREA ELECTRICĂ A CENTRELOR DE DATE

Nr. Crt.	SoC real [%]	SoC estimat[%]	Eroare absolută [%]	Eroare relativă [%]	SoH real [%]	SoH estimat[%]	Eroare absolută [%]	Eroare relativă [%]
1	60	52,22	7,78	12,96	92	95,12	-3,12	3,39
2	75	71,18	3,82	5,09	86	89,62	-3,62	4,20
3	90	91,44	-1,44	1,60	81	84,96	-3,96	4,88

Erorile relative obținute la estimarea *SoC* se încadrează în intervalul 1,60 – 12,96 %, depășind limita de 5% care este considerată standardul în domeniu, doar pentru bateria nr.1. De menționat că metoda de estimare a *SoC* bazată pe două impulsuri de descărcare este folosită doar în intervalul 40 – 100 %, ceea ce face ca *SoC* a bateriei nr.1 să se încadreze în prima treime a intervalului de măsură unde se acceptă erori cu valori mai mari spre 10 %.

La estimarea *SoH* domeniul de erori este mult mai restrâns 3,39 – 4,88 %, sub limita de 5%, eroarea maximă fiind obținută pentru *SoH* cu valoarea cea mai mică. De asemenea, bateriile VRLA folosite în cadrul UPS-urilor se consideră că și-au atins durata de viață în jurul valorii de 80% *SoH* (motiv pentru care au fost alese aceste baterii pentru studiu), ceea ce permite ca în cadrul utilizării dispozitivului să se impună o limită de măsurare de 83%, sub care bateriile VRLA trebuie să fie înlocuite. Această limită a fost aleasă pentru că în urma măsurărilor făcute *SoH* estimat este în general superior *SoH* real.

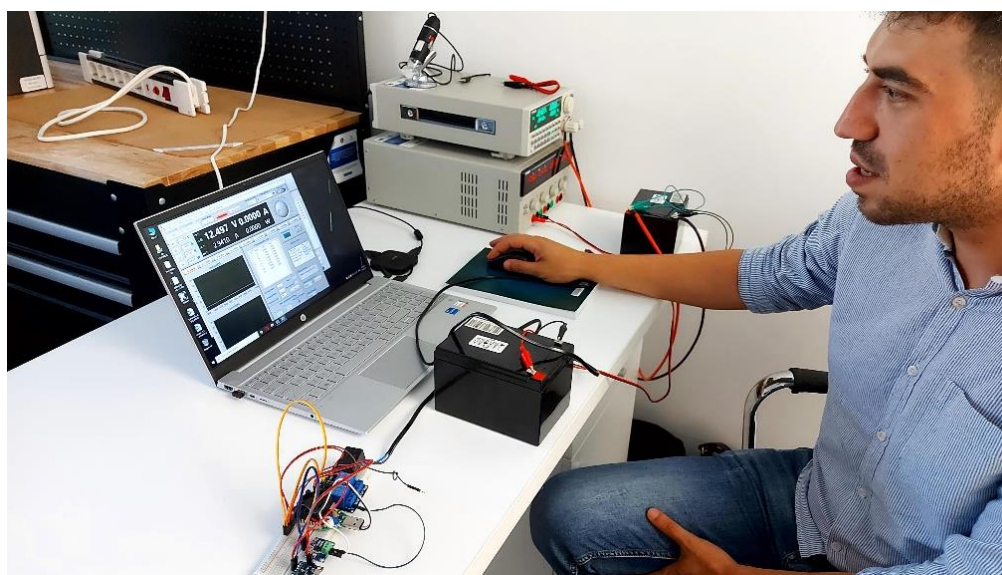


Fig.6. 10. Bancul de experimentare

CONCLUZII

Concluzii generale

Lucrarea abordează problematica complexă a sistemelor de alimentare neîntreruptibilă cu energie electrică a echipamentelor electrice sensibile conectate la rețea.

În prezent sistemele de backup (UPS) se află la o răscruce tehnologică, vechile baterii VRLA fiind pe punctul de a fi înlocuite cu baterii Li-Ion. Cu toate acestea, în prezent, majoritatea UPS-urilor încă folosesc baterii VRLA și nu sunt prevăzute cu sisteme de monitorizare a stării de sănătate (*SoH*).

În acest context, lucrarea de față vine să răspundă la cele două probleme majore. Prin realizarea modelului funcțional al unui UPS se permite determinarea exactă a parametrilor unei baterii Li-Ion care poate înlocui o baterie VRLA, iar prin prototipul dezvoltat se asigură și estimarea cu acuratețe ridicată a stării de sănătate a bateriilor VRLA aflate în funcțiune la UPS-uri care nu dispun de sisteme de management avansate.

Pornind de la studiul topologiilor de UPS-uri care sunt folosite în Centrele de Date și în alte locații sensibile la alimentarea cu energie electrică, pe baza informațiilor obținute de la un UPS funcțional, a fost realizat un model la nivel de bloc funcțional al unui UPS online. Acest model a fost validat cu date experimentale ce permit studierea diferitelor tehnologii de baterii ca sursă de energie de rezervă pentru un UPS. Modelul dezvoltat reprezintă o alternativă optimizată la stabilirea capacității bancului de baterii, față de metoda clasică care se bazează doar pe puterea aparentă a consumatorului.

Prin prototipul dezvoltat, starea de sănătate a bateriilor VRLA poate să fie estimată cu acuratețe, aducând astfel un nou nivel de optimizare a utilizării acestora. Astfel, momentul de timp în care o baterie VRLA trebuie să fie înlocuită este determinat cu exactitate, chiar dacă UPS-ul nu este prevăzut cu un sistem de management care să monitorizeze acest aspect.

Contribuții personale

Având în vedere cele de mai sus, pot afirma că în prezenta teză de doctorat contribuțiile personale au avut în vedere următoarele direcții:

- **Conceptual:** studierea principalelor tehnologii de realizare pentru UPS-uri și bateriile care le echipează;
- **Experimental:** realizarea unui prototip de testarea a bateriilor VRLA în vederea estimării *SoC*, respectiv *SoH*, prototip validat pe cale experimentală;
- **Tehnologic:** dezvoltarea unei metodologii de determinare a capacității unei baterii Li-Ion care poate înlocui o baterie VRLA într-un UPS, pe baza unui model funcțional de UPS și a datelor de funcționare ale bateriei furnizate de producător.

Apreciez drept contribuții personale în domeniu:

1. Un studiu amplu, pe baza parcurgerii unui important număr de referințe bibliografice, referitor la tehnologiile actuale de realizare pentru UPS-uri și pentru bateriile care le echipează.
2. Un studiu bibliografic cuprinzător privind modelarea bateriilor în vederea integrării modelului bateriei în modelul funcțional al UPS.
3. Realizarea unui model funcțional pentru un UPS-online validat pe cale experimentală
4. Dezvoltarea unei noi metodologii de determinare a capacității optime a unei baterii VRLA, Li-Ion sau LiFePO_4 second-life, care poate echipa un UPS, pe baza modelului dezvoltat.
5. Studiul principalelor metode de examinare a stării de încărcare și de sănătate a unei baterii VRLA
6. Proiectarea și realizarea unui echipament folosit la determinarea *SoC* și *SoH* a unei baterii VRLA care echipează un UPS.
7. Dezvoltarea unei noi metodologii de înlocuire a bateriilor VRLA pe baza prototipului realizat.

Bibliografie selectivă

- [1] *** ANSI/TIA-942 Standard , www.tiaonline.org/standards
- [2] Chafai, S, TIA-942 Data Centre Standards Overview, <https://www.academia.edu/14509572/>
- [3] *** EN 50600 Data Center Standards, <https://www.tuvit.de/en/services/data-centers-colocation-cloud-infrastructures/din-en-50600/>
- [4] *** Data Center 2025: Exploring the Possibilities, EmersonNetworkPower.com
- [7] Hintemann, R. , Consolidation, Colocation, Virtualization, and Cloud Computing – The Impact of the Changing Structure of Data Centers on Total Electricity Demand. Advances in Intelligent Systems and Computing, Springer Berlin Heidelberg.
- [8].Harkeeret, S., The Green Grid’s Data Center Maturity Model, www.thegreengrid.org
- [9] Liam Newcombe, Data centre energy efficiency metrics, <https://dcgs.bcs.org>
- [12] *** <http://www.google.co.in/green/bigpicture/#/>
- [13] *** <http://www.datacenterknowledge.com/archives/2015/04/27/second-yahoo-data-center-comes-online-in-new-york-state>
- [14] *** <http://technet.microsoft.com/en-us/library/cc700692.aspx>
- [16] *** <https://datacentercatalog.com/romania>
- [17] *** <https://datacentercatalog.com/greece>
- [18] *** Data Center Infrastructure Resource Guide, ANIXTER, www.anixter.com
- [19] Wendy, T, Types of Prefabricated Modular Data Centers, White Paper 165, Schneider Electric
- [22] *** Optimal Solutions for Data Center Connect (DCC), Strategic White Paper, www.alcatel-lucent.com
- [24] *** AC vs. DC in a battle for data center efficiency, www.itworld.com/data-centerservers/.
- [26] Hallahan, R, Data center design decision and their impact on power system infrastructure, White Paper, www.cumminspower.com
- [28] *** The large UPS battery handbook, Eaton.com/UPSbatteries
- [32] Wu, H., Data Center Energy, White Paper 01- Development of the UPS Architecture, <https://e.huawei.com/en/material/networkenergy/dcenergy>
- [34] G. J. May, A. Davidson and B. Monahov, Lead batteries for utility energy storage: A review, J. Energy Storage, 2018, 15, 145–157.
- [38] S. Bobba, F. Mathieux, and G. A. Blengini, How will second-use of batteries affect stocks and flows in the EU? A model for traction Li-ion batteries, Resour. Conserv. Recycl., vol. 145, no. October 2018, pp. 279–291, 2019.
- [39] M. S. H. Lipu et al., A review of state of health and remaining useful life estimation methods for lithium-ion battery in electric vehicles: Challenges and recommendations,” J. Clean. Prod., vol. 205, pp. 115–133, 2018.
- [40] L. C. Casals, B. A. García, F. Aguesse and A. Iturrondobeitia, Second life of electric vehicle batteries: relation between materials degradation and environmental impact, Int. J. Life Cycle Assess., 2017, 22, 82–93.
- [44] J. Tian, R. Xiong, and W. Shen, A review on state of health estimation for lithium ion, eTransportation, p. 100028, 2019.
- [45] X. Lai, D. Qiao, Y. Zheng, M. Ouyang, X. Han, and L. Zhou, A rapid screening and regrouping approach based on neural networks for large-scale retired lithium-ion cells in second-use applications,” J. Clean. Prod., vol. 213, pp. 776, 2019.
- [46] ***USABC *Electric Vehicle Battery Test Procedures Manual*, <http://www.uscar.org>
- [47] *** PNGV *Battery Test Manual*, Revision 3, 2001,
- [52] Hu, M., Li, Y., Li, S., Fu, C., Qin, D., Li, Z., Lithium-ion battery modeling and parameter identification based on fractional theory, Energy, 2018, 165, 153–163
- [53] Doerffel, D., Abu Sharkh, S., A critical review of using the Peukert equation for determining the remaining capacity of lead-acid and lithium-ion batteries, Journal

CONTRIBUȚII PRIVIND POSIBILITATEA REUTILIZĂRII BATERIILOR
ÎN ALIMENTAREA ELECTRICĂ A CENTRELOR DE DATE

- of Power Sources , (2006), 395–400
- [55] Enache,B., Lefter,E., Stoica, C., Comparative Study for Generic Battery Models for Electric Vehicles, IEEE Xplore, ISBN 978-1-4673-5979-5, 2013
- [56] Saxena, S., Raman, S.R., Saritha, B., John, V. A novel approach for electrical circuit modeling of Li-ion battery for predicting the steady-state and dynamic I–V characteristics. Sadhana, 2016, 41, 479–487.
- [57] Sangwan, V., Sharma, A., Kumar, R., Rathore, A.K., Equivalent circuit model parameters estimation of li-ion battery: C-rate, soc and temperature effects. Proceedings of the 2016 IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES), Kerala, India, 2016, p 1-6
- [58] Abbas, F., Auger,D., Propp, K., A review on electric vehicle battery modelling; From Lithium-ion toward Lithium -Sulphur, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol.56, 2016, Pages 1008-1021
- [60] Glass, M.C., Battery electrochemical nonlinear/dynamic SPICE model. Proceedings of the IECEC 96, Washington, DC, USA, 1996; Volume 1, pp. 292–297
- [62] Pop, V, Bergveld,H. J., Notten, P. H., Op het Veld, L. J. H. G and Regtien, P. P. L., Accuracy analysis of the state-of-charge and remaining run-time determination for lithium-ion batteries, Measurement, vol. 42, no. 8, pp. 1131–1138, 2009.
- [63] Schweiger H-G, Obeidi O., Komesker, O., Comparison of Several Methods for Determining the Internal Resistance of Lithium Ion Cells, Sensors 2010,10, p.5604
- [70] Zhao,G, Examples for Reuse of Power Batteries, In book: Reuse and Recycling of Lithium-Ion Power Batteries, May 2017, DOI: 10.1002/9781119321866.ch3
- [71] Tang,I, and co., Predictive Maintenance of VRLA Batteries in UPS towards Reliable Data Centers, IFAC World Congress 2020
- [72] Karpati,A, Zsigmond,G and co., UPS for data center, Intelligent Systems and Informatics (SISY), 2012 IEEE 10th Jubilee International Symposium
- [73] Haider, A, Zhao,Q., Cluster-Based Prediction for Batteries in Data Centers, Energies 13(5):1085, 2020
- [78] Glass, M.C., Battery electrochemical nonlinear/dynamic SPICE model. Proceedings of the IECEC 96, Washington, DC, USA, 1996; Volume 1, pp. 292–297
- [79] *** Matlab, Generic Battery Model,
<https://www.mathworks.com/help/sps/powersys/ref/battery.html>