



**UNIVERSITATEA POLITEHNICA  
DIN BUCUREȘTI**



**Școala Doctorală de Electronică, Telecomunicații  
și Tehnologia Informației**

**H.S. nr. 722 din 02-08-2021**

# **REZUMAT TEZĂ DE DOCTORAT**

**Ing. Rodica-Cristina PAVEL (NEGROIU)**

---

**CERCETĂRI ASUPRA PARAMETRILOR  
ELECTRICI AI SUPERCONDENSATOARELOR**

---

## **COMISIA DE DOCTORAT**

<b>Prof. Dr. Ing. Gheorghe BREZEANU</b> Univ. Politehnica din București	Președinte
<b>Prof. Dr. Ing. Paul SVASTA</b> Univ. Politehnica din București	Conducător de doctorat
<b>Prof. Dr. Ing. Ioan LIȚĂ</b> Univ. din Pitești	Referent
<b>Dr. Fizician Mihai VARLAM</b> ICSI, Râmnicu Vâlcea	Referent
<b>Prof. Dr. Ing. Ciprian IONESCU</b> Univ. Politehnica București	Referent

**BUCUREȘTI 2021**

# Cuprins

<b>1. Introducere</b> .....	1
1.1. Prezentarea domeniului tezei de doctorat.....	1
1.2. Scopul tezei de doctorat .....	2
1.3. Conținutul tezei de doctorat .....	3
<b>2. Noțiuni teoretice</b> .....	3
<b>3. Materiale utilizate în construcția supercondensatoarelor</b> .....	6
<b>4. Analiza parametrilor principali ai supercondensatoarelor în concordanță cu topologia acestora în circuitele electrice</b> .....	8
4.1. Analiza asupra conexiunilor serie, respectiv paralel ale supercondensatorului și influența timpului de stabilizare .....	8
4.1.1. Introducere în problematica conexiunilor serie și paralel ale supercondensatoarelor.....	8
4.1.2. Descrierea modului de lucru .....	9
4.2. Influența curentului de încărcare - descărcare asupra diferiților parametri ai supercondensatoarelor .....	11
<b>5. Metode de determinare a curentului de pierdere al supercondensatoarelor</b> .....	13
5.1. Determinarea curentului de pierdere (prima metodă) .....	14
5.2. Determinarea autodescărcării (a doua metodă).....	14
5.3. Rezultate experimentale .....	14
5.3.1. Rezultate obținute prin prima metodă - curentul de pierdere .....	15
5.3.2. Rezultate obținute prin cea de-a doua metodă – autodescărcare .....	15
<b>6. Investigații privind spectroscopia de impedanță electrochimică asupra diferitelor tipuri de supercondensatoare</b> .....	16
6.1. Metoda spectroscopiei de impedanță electrochimică (EIS) și metoda directă (DM).....	16
6.1.1. Dependența capacității față de tensiunea aplicată la bornele supercondensatoarelor utilizând metoda spectroscopiei de impedanță electrochimică.....	17
6.1.2. Influența temperaturii asupra părții reale $Z'$ , respectiv părții imaginare $Z''$ a impedanței pentru trei tipuri de supercondensatoare .....	17

6.1.3. Implementarea relațiilor matematice Kramers-Kronig asupra datelor experimentale obținute în cadrul cercetării anterioare.....	19
<b>7. Tehnologia de realizare a unei celule (supercondensator) de tip Pouch și testarea acesteia.....</b>	<b>20</b>
7.2. Metoda de realizare a celulei (supercondensatorului) de tip Pouch.....	21
7.2.1. Supercondensator vs. Baterie.....	21
7.2.2. Caracteristicile tehnice ale celulei de tip Pouch .....	21
7.2.3. Materiale utilizate în realizarea supercondensatorului, celulă de tip Pouch.....	22
7.2.4. Procesul de realizare al celulei de tip Pouch.....	22
7.3. Metoda de testare a celulei (supercondensatorului) de tip Pouch și rezultate experimentale obținute în urma testării .....	22
7.3.1. Procedura de testare a celulei realizate .....	23
7.3.2. Rezultate experimentale.....	23
<b>8. Concluzii.....</b>	<b>24</b>
8.1. Rezultate obținute.....	24
8.2. Contribuții originale .....	25
8.3. Lista lucrărilor originale.....	26
8.4. Perspective de dezvoltare ulterioară.....	28
<b>Bibliografie .....</b>	<b>29</b>

# Capitolul 1

## Introducere

În zilele noastre, în domeniul electronicii se pune mare accent pe durata de viață a echipamentelor electronice și implicit pe durata de viață a componentelor electronice ce alcătuiesc respectivele echipamente, dar și pe găsirea unor soluții care să îndeplinească toate normele de poluare impuse la nivel european cu privire la protejarea vieții oamenilor, dar și a mediului înconjurător. De asemenea, stocarea de energie în cantități mari și utilizarea acesteia în aplicații atunci când nevoia o impune este o altă cerință a domeniului actual. Se pare că supercondensatorul este componenta electronică pasivă, care înglobată în diverse echipamente electronice, este capabilă să satisfacă toate aceste cerințe actuale ale pieței.

### 1.1. Prezentarea domeniului tezei de doctorat

În ultima perioadă, problematica surselor de alimentare ale circuitelor electronice reprezintă o adevărată provocare, în special în cazul dispozitivelor mobile. Utilizarea în sistemele de stocare, cu preponderență, a bateriilor clasice în industrie nu este o soluție viabilă deoarece aceste dispozitive după 2-3 ani își pierd capacitatea de stocare a electricității. Pe de altă parte materialele utilizate în realizarea acestora sunt poluante, chiar interzise în unele țări în conformitate cu Reglementările Uniunii Europene, precum RoHS 1 și RoHS 2 [49]. Se observă în ultimul timp utilizarea unei soluții promițătoare în concordanță cu aceste standarde, și anume utilizarea supercondensatorului ca și sursă de stocare a energiei.

Supercondensatoarele sau condensatoare electrochimice cu strat dublu (EDLCs – Electrochemical Double-Layer Capacitors) sunt componente ce tind să înlocuiască bateriile convenționale. Nu conțin plumb sau alte materiale poluante pe o parte și pe de altă parte pot acumula cantități mari de sarcină electrică. EDLC-urile au o durată de viață foarte lungă (sute de mii cicluri de încărcare-descărcare), intervalul temperaturilor de operare este mai mare în comparație cu cel al bateriilor și au o densitate de putere destul de mare ceea ce permite salturi de curent atunci când este necesar în diferite aplicații. Astfel, supercondensatoarele reprezintă o soluție viabilă privind utilizarea lor într-un sistem de stocare a energiei, însă fiind o componentă în continuă dezvoltare întotdeauna se pune problema identificării unei funcționări cu performanțe cât mai bune. Pentru aceasta este nevoie de numeroase teste realizate în diferite condiții de funcționare pentru a simula cât mai bine situații reale în care ar putea fi utilizate aceste componente. Totodată, producătorii acestor componente nu oferă suficiente informații cu privire la parametrii electrici principali ai supercondensatoarelor. Singura soluție de determinare a acestora este efectuarea de teste asupra componentelor și, mai apoi determinarea parametrilor ce prezintă importanță în funcție de aplicația în care sunt utilizate aceste supercondensatoare.

Din punct de vedere constructiv, supercondensatoarele au la bază trei mari părți componente, și anume: două folii de aluminiu pe care este depus materialul pentru realizarea electrozilor, soluția de electrolit și separatorul. De-a lungul timpului, performanțele supercondensatorului au fost îmbunătățite prin utilizarea de materiale ce aveau ca scop diminuarea neajunsurilor pe care acesta le prezintă.

Cercetările actuale ale supercondensatoarelor investighează problema utilizării lichidelor ionice ca și electrolit cu scopul de a crește tensiunea maximă de lucru pe o singură celulă. De asemenea, pentru realizarea materialului pentru electrod se fac numeroase încercări în direcția utilizării structurilor metalice organice (Metal Organic Frameworks – MOFs). Avantajul major pe care îl prezintă aceste structuri metalice constă în suprafața activă imensă pe care o prezintă în comparație cu alte materiale pe bază de carbon utilizate pentru realizarea electrozilor.

Astfel, supercondensatorul este o componentă electronică pasivă care este capabilă să aducă contribuții majore industriei din punct de vedere al recuperării de energie date fiind condițiile actuale și viitoare impuse de reglementările internaționale privind normele de poluare și de regenerare a energiei.

## **1.2. Scopul tezei de doctorat**

Supercondensatorul reprezintă o componentă electronică pasivă relativ nouă dacă ar fi să comparăm din punct de vedere al apariției acest kit cu condensatoarele electronice. Aflându-se în continuă dezvoltare, aceasta poate deveni o componentă cu o mare utilitate în diferite aplicații ce implică stocarea energiei. Pentru aceasta este mai mult decât necesar să-i cunoaștem comportarea prin identificarea avantajelor, dar și a dezavantajelor pe care supercondensatorul le prezintă. Astfel, determinarea anumitor parametri uzuali (rezistența echivalentă serie, autodescărcarea, curentul de pierdere, densitatea de energie, densitatea de putere) ai componentei este imperios necesară deoarece aceasta reprezintă modalitatea prin care putem să identificăm, să comparăm și să caracterizăm diferitele componente.

Lucrarea de față încearcă să aducă contribuții privind cercetări asupra parametrilor electrici ai supercondensatoarelor prin identificarea procedurii de conducție al supercondensatorului, prin efectuarea de cercetări asupra diferitelor materiale utilizate în realizarea componentei, dar și numeroase studii privind determinarea parametrilor electrici pentru diferite supercondensatoare existente pe piață. Aceste experimente vor fi realizate în diferite condiții de testare, astfel încât să poată simula cât mai mult funcționarea supercondensatorului în aplicații reale. Pentru aceasta se vor realiza teste la diferite temperaturi de funcționare. De asemenea, se vor crea și testa baterii de două și trei supercondensatoare în conexiuni serie și paralel, luând în calcul absența și prezența timpului de stabilizare.

Totodată, în urma cercetărilor realizate se vor acumula suficiente cunoștințe pentru realizarea unui supercondensator. Procedeele de realizare și testare ale supercondensatorului vor fi detaliate în lucrarea de față.

### 1.3. Conținutul tezei de doctorat

Prezenta teză de doctorat este structurată în 8 capitole după cum urmează:

- În capitolul 1 al tezei sunt prezentate domeniul tezei de doctorat și scopul acesteia.
- Capitolul 2 cuprinde informații cu privire la noțiuni din domeniul electrochimiei ce stau la baza realizării și funcționării supercondensatorului, principiul de funcționare al acestuia, parametrii electrici principali, dar și variante constructive comerciale de supercondensatoare.
- În capitolul 3 sunt caracterizate principalele materiale ce se pot utiliza în realizarea materialelor pentru electrod, principalele soluții de electrolit utilizate și totodată sunt prezentate caracteristicile pe care ar trebui să le dețină un bun separator. Toate acestea reprezintă părțile principale ale supercondensatorului.
- Capitolul 4 reprezintă o analiză a parametrilor principali ai supercondensatoarelor în concordanță cu topologia acestora în circuitele electrice.
- Capitolul 5 exemplifică două metode de determinare a curentului de pierdere al supercondensatoarelor. Prima metodă constă în determinarea directă a curentului de pierdere, iar cea de-a doua metodă constă în determinarea autodescărcării în primă fază, iar mai apoi, în urma realizării calculelor matematice, s-a obținut valoarea curentului de pierdere.
- În capitolul 6 sunt prezentate informații cu privire la aplicarea metodei spectroscopiei de impedanță electrochimică asupra diferitelor tipuri de supercondensatoare comerciale. Acest capitol tratează trei subiecte a căror rezultate au fost determinate cu ajutorul metodei mai sus menționată.
- În capitolul 7 este prezentat în detaliu procesul de realizare a unui supercondensator, celulă de tip Pouch. Acest supercondensator a fost testat, iar rezultatele obținute în urma interpretării datelor experimentale sunt cuprinse tot în cadrul acestui capitol.
  - Capitolul 8 sintetizează rezultatele obținute în cadrul tezei, prezintă contribuțiile originale rezultate în urma efectuării experimentelor elaborate pe parcursul tezei. De asemenea, în acest capitol este expusă lista de lucrări publicate în decursul stagiului doctoral, dar și o serie de perspective de dezvoltare ulterioară, subiecte ce reprezintă o continuitate a cercetărilor realizate până în momentul actual.

## Capitolul 2

### Noțiuni teoretice

În acest capitol sunt prezentate succint elemente introductive ale electrochimiei, domeniu ce stă la baza funcționării supercondensatorului, dar și informații cu privire la realizarea stratului de sarcină electric de la începutul descoperirii stratului dublu de sarcină electrică de către Hermann von Helmholtz în anul 1856 până la definirea acestui strat de către Gouy și Chapman. Aceștia din urmă au concluzionat faptul că în interiorul supercondensatorului se realizează un strat multiplu de sarcină și nu un strat dublu cum a specificat Helmholtz la începutul descoperirii acestuia. Tot în acest

capitol sunt prezentate și principiul de funcționare al supercondensatorului, variante constructive comerciale de supercondensatoare, dar și parametrii electrici ai acestora.

## 2.1. Soluții de electroliți

Electroliții reprezintă acele substanțe ce au importanta proprietate de conducere a curentului electric în topitură sau în soluție. Deoarece conduc curentul electric pe baza unui mecanism ionic, aceștia sunt numiți *conductori electrici de ordin II* [2].

### 2.1.1. Gradul de disociație electrolică

Svante Arrhenius susține că pe lângă ioni, în urma procesului de disociație electrolică rămân în soluție și molecule nedisociate. Astfel, este definit gradul de disociație electrolică  $\alpha$  ca fiind raportul dintre numărul de molecule disociate în ioni din interiorul soluției de electrolit și numărul total de molecule din electrolit. Prin urmare, în urma calculării gradului de disociație electrolică putem afla câte părți din moleculele soluției de electrolit au disociat în ioni și câte au rămas nedisociate. Din punct de vedere al capacității de disociere în ioni, electroliții au fost împărțiți în electroliți tari și slabi. Diferența dintre cele două tipuri de electroliți constă în gradul de disociație electrolică. Mai exact, dacă în soluție se găsesc, în urma procesului de disociație electrolică, atât ioni, cât și molecule nedisociate, atunci vorbim de electroliți slabi. Dacă în soluție se găsesc doar ioni în urma disocierii, putem spune că acel electrolit este un electrolit tare. Astfel, gradul de disociație electrolică pentru electroliții tari este egal cu 1, iar pentru electroliții slabi această valoare este mai mică decât 1.

## 2.2. Electrocul

Un electrod este reprezentat de un material conductor de ordin I ce se află în contact cu un material conductor de ordinul II. Reprezintă de fapt un ansamblu realizat din două materiale: materialul conductor electronic pe de-o parte și materialul conductor ionic de cealaltă parte [3].

## 2.3. Introducere în stratul de sarcină electrochimic

Noțiunea de strat dublu de sarcină electrochimic a apărut în 1853 când Hermann von Helmholtz a descoperit că la interfața dintre electrod și soluția de electrolit apare un strat dublu de sarcină ce este realizat din sarcinile încărcate electric de la nivelul electrodului și ionii de semn opus din soluția de electrolit.

Ulterior, după anul 1900, Gouy, Chapman, Stern și Grahame vin cu numeroase cercetări în domeniu și contrazic oarecum cele descoperite de către Helmholtz. Aceștia menționează faptul că acest strat dublu ce se realizează la interfața electrod-electrolit este de fapt un strat multiplu format dintr-un plan (strat) Helmholtz intern

denumit prescurtat PHI, un plan (strat) Helmholtz extern denumit prescurtat PHE și un strat difuz (a se vedea Fig. 2. 3) [2].

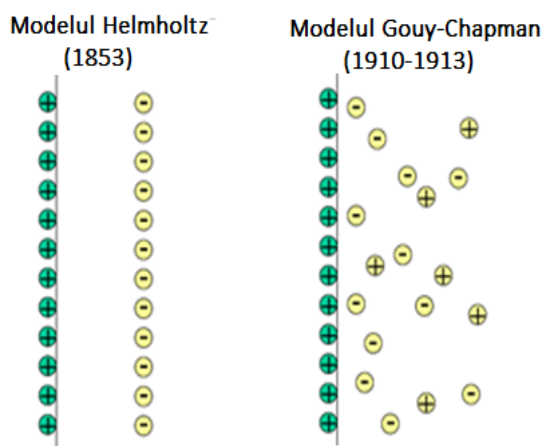


Fig. 2. 3 Modelul Helmholtz și modelul Gouy-Chapman [2].

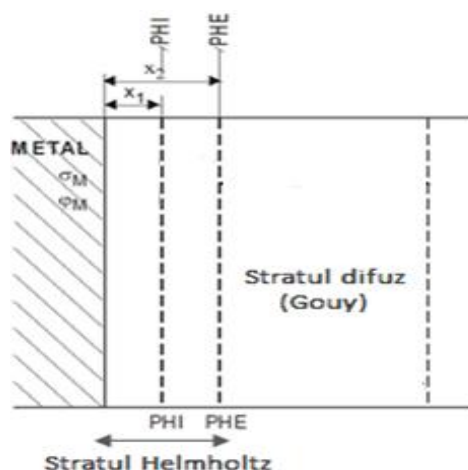


Fig. 2. 4 Structura internă a modelul Gouy-Chapman [4].

## 2.4. Structura constructivă a supercondensatorului și principiul de funcționare al acestuia

Așa cum este descris în conținutul tezei, supercondensatorul este realizat din trei mari părți componente: cele două folii de aluminiu pe care se găsește depus materialul pentru realizarea electrozilor, soluția de electrolit (electrolitul) și separatorul. O formă constructivă a supercondensatorului cilindric este prezentată în Fig. 2. 8.

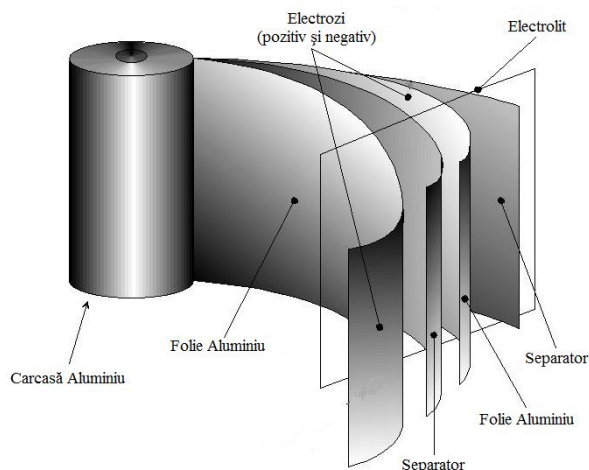


Fig. 2. 8 Părțile componente ale unui supercondensator.

Principiul de funcționare al supercondensatorului se bazează pe realizarea celor două straturi multiple de sarcină electrică la interfața dintre electrod și electrolit. În cazul ambelor straturi de sarcină realizate ionii sunt adsorbiți de către sarcinile de semn contrar de la nivelul electrodului. Realizarea stratului de sarcină se produce atunci când la bornele supercondensatorului se aplică o tensiune mai mică sau egală cu tensiunea maximă de lucru a acestuia specificată de către producător în fișa tehnică a componentei. Dacă pe electrozii supercondensatorului nu există nicio tensiune



electrică, pe suprafața acestora nu va exista sarcină electrică, iar ionii din soluția de electrolit vor avea o distribuție aleatorie în masa soluției. Acest procedeu este exemplificat la nivel macroscopic în Fig. 2. 9 [10].

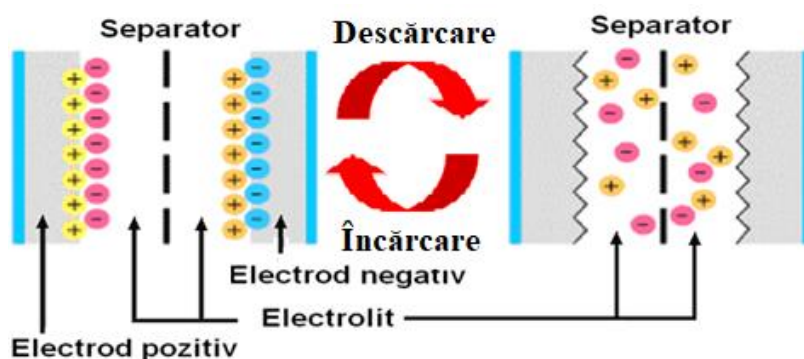


Fig. 2. 9 Procesul de încărcare / descărcare al unui supercondensator.

## Capitolul 3

### Materiale utilizate în construcția supercondensatoarelor

#### 3.1. Materiale utilizate pentru realizarea electrozilor

Acest capitol prezintă informații cu privire la materialele utilizate în realizarea unui supercondensator. Astfel, sunt prezentate principalele caracteristici pe care ar trebui să le dețină materialele utilizate pentru realizarea electrozilor unui supercondensator, comparații între diferite materiale utilizate în prezent, dar și informații cu privire la noi materiale utilizate ce prezintă performanțe deosebite din punct de vedere al suprafeței specifice active. Principalul material ce a stat la baza realizării supercondensatoarelor încă de la apariția acestora a fost carbonul în diferite forme. Acesta reprezintă și în zilele noastre o alternativă viabilă cu toate că tehnologia a evoluat și o serie de noi materile contribuie la îmbunătățirea performanțelor acestor componente.

În tabelul de mai jos sunt rezumate principalele caracteristici ale celor trei tipuri de carbon utilizate ca și electrod în realizarea supercondensatoarelor.

Tab. 3.1 Principalele caracteristici ale materialelor pe bază de carbon

Parametru	Cărbune activ (AC)	Grafena	Nanotuburi de carbon
Densitatea de energie (Wh/kg)	4-5	~100	~ 10
Densitatea de putere (kW/kg)	1-2	~50	~ 20
Capacitatea specifică (F/g)	< 100	~550	180
Aria suprafeței (m <sup>2</sup> /g)	> 1000	> 2600	500
Conductivitate electrică (S/m)	Mult mai mică decât a grafenei	200	1000

### 3.2. Electroliți

De asemenea, sunt prezentate în cadrul acestui capitol noțiuni privitoare la tipurile de electroliți utilizați în realizarea supercondensatoarelor, diferențele existente între cele trei soluții de electroliți (apros, organic și lichid ionic) din punct de vedere al tensiunii maxime de lucru acceptată, dar și al conductivității ionice.

În tabelul de mai jos sunt rezumate caracteristicile celor mai utilizate soluții electroliți în realizarea supercondensatoarelor.

*Tab. 3.2 Principalele caracteristici ale celor mai utilizați electroliți în realizarea supercondensatoarelor*

Solvent	Electrolit	Temperatura de operare (°C)	Conductivitate ionică (mS/cm)	Tensiunea maximă de lucru (V)
Electrolit apos				
Apă	KOH, 4M	25	540	1,2
	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , 2M	25	750	1,2
	KCl, 2M	25	210	1,2
	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , 1M	25	91,1	1,2
Electrolit organic				
Carbonat de propilenă	Et4NBF <sub>4</sub> , 1M	25	14,5	2,7
Acetonitril	Et4NBF <sub>4</sub> , 1M	25	59,9	2,7
Lichid ionic				
Lichid ionic	[EtMeIm] <sup>+</sup> [BF <sub>4</sub> ] <sup>-</sup>	25	8	4
	[EtMeIm] <sup>+</sup> [BF <sub>4</sub> ] <sup>-</sup>	100	14	3,25

### 3.3. Separatorul

Separatorul, deși de cele mai multe ori în literatură acestuia nu i se acordă suficientă importanță, are un rol extrem de important în funcționalitatea unui supercondensator, iar alegerea lui trebuie făcută astfel încât să se țină seamă de o serie de caracteristici pe care acesta ar trebui să le dețină. Spre exemplu un bun separator ar trebui să asigure o bună izolare, trebuie să aibă o conductivitate ionică ridicată, să fie subțire, dar în același timp trebuie să prezinte o rezistență mecanică ridicată și să nu întâmpine probleme de coroziune în contact cu electrolitul. Cele mai utilizate separatoare în realizarea supercondensatoarelor sunt poliolefinele.

## Capitolul 4

### **Analiza parametrilor principali ai supercondensatoarelor în concordanță cu topologia acestora în circuitele electrice**

Capitolul 4 cuprinde două părți importante în ceea ce privește studiul parametrilor principali ai supercondensatoarelor, având în vedere comportarea acestora în diferite circuite electrice. Prin această cercetare am încercat să simulez anumite situații ce pot apărea în practică și important de știut este modul în care acești parametri se modifică și ce influență au asupra circuitelor în care sunt înglobate supercondensatoarele respective. Am încercat să observ comportarea anumitor parametri în situația în care supercondensatorul nu este utilizat întru-totul conform cerințelor din standardele internaționale și sunt încălcate anumite limite deoarece, în practică nu se pot respecta în totalitate aceste considerente.

Astfel, în cadrul acestui capitol am prezentat experimentele realizate și am detaliat rezultatele obținute în diferite situații după cum urmează:

1. Analiza asupra conexiunilor serie, respectiv paralel de două supercondensatoare de 22 F / 2,5 V și 200 F / 2,7 V în funcție de temperatură, respectiv trei supercondensatoare de 22 F / 2,5 V având în vedere calculul capacității teoretice și experimentale, dar și influența timpului de stabilizare asupra valorii capacității după efectuarea încărcării.

2. Influența curentului de încărcare - descărcare asupra diferiților parametri ai supercondensatoarelor, precum capacitate, rezistența echivalentă serie (ESR), puterea disipată și timpul necesar pentru încărcarea, respectiv descărcarea supercondensatorului.

#### **4.1. Analiza asupra conexiunilor serie, respectiv paralel ale supercondensatorului și influența timpului de stabilizare**

##### **4.1.1. Introducere în problematica conexiunilor serie și paralel ale supercondensatoarelor**

În acest subcapitol am prezentat o serie de noțiuni introductive cu privire la realizarea conexiunilor serie și paralel ale supercondensatoarelor ținând seamă de distribuția tensiunii maxime de lucru pe fiecare supercondensator în parte. De asemenea, tot în cadrul acestui subcapitol sunt prezentate două soluții utilizate în literatura de specialitate pentru a realiza o bună echilibrare a tensiunilor și a nu ajunge în situația de a distruge vreo componentă din structura întregii conexiuni prin depășirea tensiunii maxime specificată în fișa tehnică.

### 4.1.2. Descrierea modului de lucru

Unul dintre obiectivele acestei cercetări este de a compara valorile capacităților pentru supercondensatoarele testate individual prin calcularea teoretică a valorii capacității pentru conexiunile serie și paralel cu cele obținute experimental în cazul conexiunilor serie și paralele ale acelorași supercondensatoare, luând în considerare, de asemenea, influența temperaturii. Prin formule matematice, cele menționate anterior s-ar traduce conform ecuațiilor de mai jos:

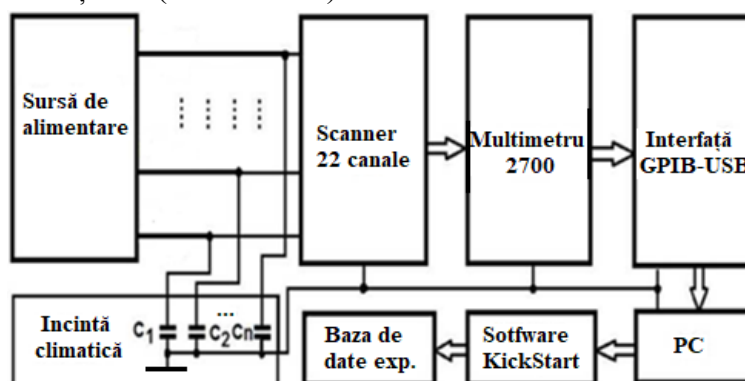
- Conexiunea paralel:

$$C_{1m\grave{a}s} + C_{2m\grave{a}s} = / \neq (C_1 + C_2)_{m\grave{a}s} \quad (4.1)$$

- Conexiunea serie:

$$\frac{C_{1m\grave{a}s}C_{2m\grave{a}s}}{C_{1m\grave{a}s} + C_{2m\grave{a}s}} = / \neq \left(\frac{C_1C_2}{C_1 + C_2}\right)_{m\grave{a}s} \quad (4.2)$$

Diagrama bloc a sistemului de măsură este prezentată în Fig. 4. 3. Sistemul include echipamente cum ar fi: sursă de alimentare de laborator, scanner, multimetru digital, data logger și o interfață PC (GPIB / USB).



*Fig. 4. 3 Diagrama bloc a sistemului de măsură.*

Sistemul de măsură împreună cu supercondensatoarele supuse testării sunt prezentate în Fig. 4. 4.



*Fig. 4. 4 Sistemul de măsură cu supercondensatoarele supuse testării.*

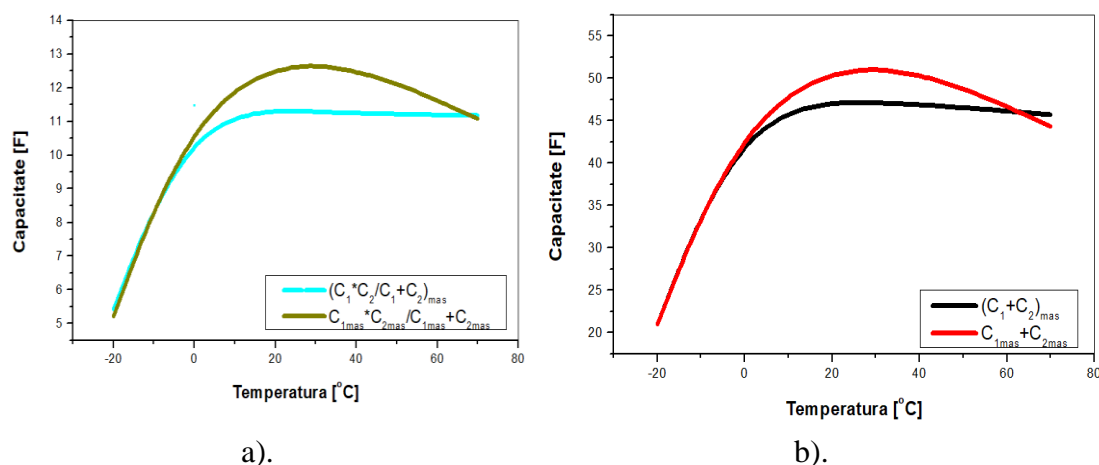
### 4.1.3. Rezultate

În experimentul realizat în această cercetare au fost testate două tipuri de supercondensatoare, de 22 F, tensiunea maximă de lucru de 2,5 V și de 200 F, tensiunea maximă de lucru de 2,7 V, individual și în conexiuni serie și paralel. În tabelul de mai jos sunt prezentate valorile capacității calculate după cum am specificat anterior la diferite valori ale temperaturii.

**Tab. 4. 2** Valorile capacității în funcție de temperatură pentru supercondensatorul de 22 F în fiecare caz, în parte.

Supercondensatoare 22 F				
Temperatura [°C]	$\frac{C_{1mas} \times C_{2mas}}{C_{1mas} + C_{2mas}}$ [F]	$\left(\frac{C_1 \times C_2}{C_1 + C_2}\right)_{mas}$ [F]	$C_{1mas} + C_{2mas}$ [F]	$(C_1 + C_2)_{mas}$ [F]
-25 °C	5,207	5,435	21,050	20,990
0 °C	11,633	11,472	46,599	46,960
~30 °C	13,265	11,251	53,713	47,445
70 °C	11,078	11,167	44,321	45,681

În cazul supercondensatorului de 22 F ar fi trebuit să se obțină ideal pentru conexiunea serie a două supercondensatoare de 22 F valoarea de 11 F, iar pentru conexiunea paralel ideal pentru aceleași două supercondensatoare ar fi trebuit să se obțină o capacitate de 44 F. La temperatura negativă la care a fost testate supercondensatorul individual, respectiv conexiunile serie și paralel se observă o comportare defavorabilă a supercondensatorului de 22 F. În acest caz am obținut valori destul de mici în toate situațiile testate, semn că funcționarea la temperaturi negative a acestui tip de supercondensator nu este una tocmai bună.



**Fig. 4. 7** Graficul capacității supercondensatoarelor de 22 F/2.5 V în conexiune serie (a), respectiv paralel (b) la temperaturile de -25 °C, 0 °C, ~30 °C și 70 °C .

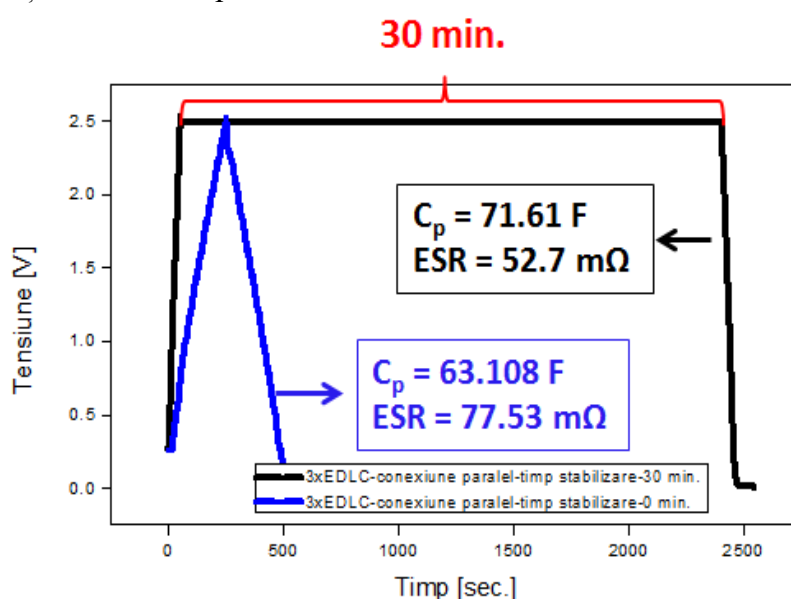
Datele experimentale prezentate mai jos reprezintă informații cu privire la influența timpului de stabilizare de 30 de minute asupra capacității și a rezistenței echivalente serie pentru conexiunea paralel de 3 supercondensatoare de 22 F.

**Tab. 4. 8** Influența timpului de stabilizare în cazul conexiunii paralele a trei supercondensatoare de 22F.

	Parametru	3 EDLC 22 F – paralel - stabilizare 30 min	3 EDLC 22 F – paralel - stabilizare 0 min
Ciclul 1	C [F]	71,6	63,1
	ESR [mΩ]	52,7	77,5
Ciclul 2	C [F]	70,6	62,9
	ESR m[Ω]	53,3	77,5

Fig. 4. 8 prezintă o imagine clară privind influența timpului de stabilizare asupra valorilor parametrilor obținuți experimental în cazul conexiunii paralele a celor trei supercondensatoare de 22 F.

După realizarea celui de-al doilea ciclu de măsurători, diferențele asupra capacității și ESR-ului se păstrează.

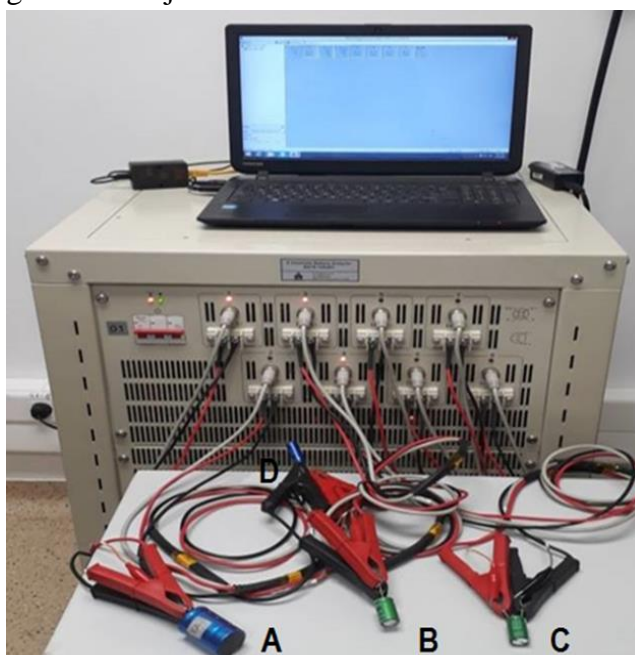


**Fig. 4. 8** Influența timpului de stabilizare în cazul conexiunii paralele a trei supercondensatoare de 22 F.

## 4.2. Influența curentului de încărcare - descărcare asupra diferiților parametri ai supercondensatoarelor

Un alt experiment din cadrul acestei teze a fost focusat pe identificarea influenței valorii curentului de încărcare-descărcare asupra parametrilor importanți ai supercondensatorului precum: capacitatea, rezistența echivalentă serie (ESR), puterea disipată și timpul de încărcare - descărcare. Curentul de încărcare - descărcare aduce modificări importante asupra parametrilor specificați mai sus. Astfel, este necesar să știm cum anume se modifică valoarea rezistenței echivalente serie atunci când creștem sau scădem valoarea curentului de încărcare - descărcare și să înțelegem ce se întâmplă, de fapt în interiorul supercondensatorului pentru a putea controla diferitele fenomene ce apar în practică [22]. Pentru realizarea măsurătorilor s-a utilizat un sistem de măsură ce există în dotarea Institutului Național de Cercetare-Dezvoltare

pentru Tehnologii Criogenice și Izotopice – ICSI, Rm. Vâlcea. Echipamentul utilizat este prezentat în figura de mai jos:



*Fig. 4. 10 Analizorul de baterii din cadrul ICSI Râmnicu Vâlcea împreună cu supercondensatoarele supuse testării [21].*

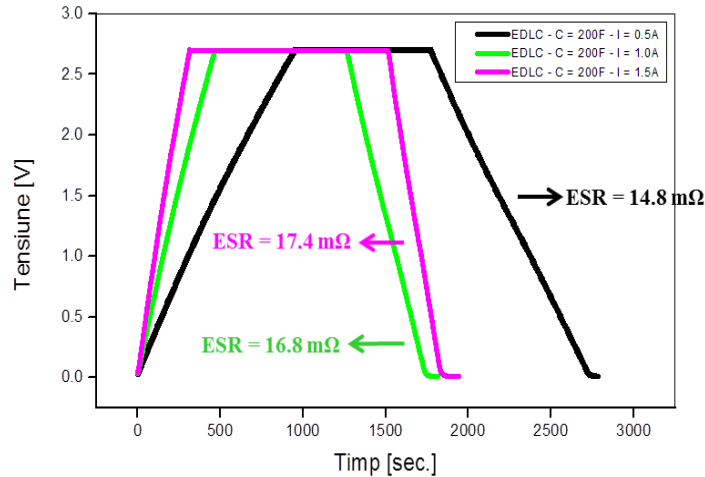
#### 4.2.1. Rezultate experimentale

În Tab. 4. 10 sunt sintetizate rezultatele obținute în cazul supercondensatorului de 200 F pentru capacitate, rezistență echivalentă serie, putere disipată și timpul de încărcare - descărcare. Se observă că valoarea capacității nu are o anumită lege după care variază în funcție de valoarea curentului de încărcare - descărcare, însă în cazul ESR-ului, puterii disipate și a timpului de încărcare - descărcare lucrurile sunt clare: pe măsură ce crește valoarea curentului de încărcare - descărcare, valorile obținute în cazul ESR-ului și al puterii disipate cresc, iar timpul de încărcare - descărcare scade [43].

*Tab. 4. 10 Influența curentului de încărcare - descărcare asupra parametrilor supercondensatorului de 200 F.*

EDLC 200 F	I = 0,5 A	I = 1 A	I = 1,5 A
C [F]	183,918	182,311	183,881
ESR [ $\Omega$ ]	14,8	16,8	17,4
P <sub>disipată</sub> [W]	0,0037	0,0168	00391
Timp [min]	1588	7,78	5,23

În Fig. 4. 11 sunt reprezentate curbele de încărcare-descărcare ale tensiunii maxime aplicată la bornele supercondensatorului de 200 F în funcție de timp la diferite valori ale curentului de încărcare - descărcare.



*Fig. 4. 11 Influența curentului de încărcare - descărcare asupra parametrilor supercondensatorului de 200 F.*

## Capitolul 5

### Metode de determinare a curentului de pierdere al supercondensatoarelor

Curentul de pierdere reprezintă unul dintre factorii cheie ai supercondensatoarelor. Mai exact, influența lui asupra parametrilor principali ai supercondensatorului poate avea efecte negative majore asupra componentei. Apariția acestui curent de pierdere este determinată de fapt de prezența a două tipuri de curent după cum urmează:

- curentul de pierdere ( $I_{lc}$ ) cauzat de mai multe procese nedorite, cum ar fi existența rezistențelor de pierdere, neuniformitatea distribuirii sarcinii pe suprafața porilor electrodului, scurtcircuitarea anodului și a catodului atunci când nu s-a realizat o sigilare corectă în procesul de realizare a supercondensatorului sau apariția energiei termice atunci când se lucrează la temperaturi mai mari.
- curentul de pierdere faradic ( $I_{lcf}$ ) apare atunci când potențialul electrodului este extins dincolo de limitele electrochimice de descompunere ale electrolitului. Acest lucru cauzează reacții faradice, ceea ce conduce la transferul de sarcină în interiorul EDLC-lui [23].

Este foarte important să determinăm valoarea curentului de pierdere și să reușim să îi înțelegem funcționarea EDLC-ului pentru că în acest fel reușim să îi diminuăm dezavantajele. Astfel, pentru determinarea acestui curent de pierdere se vor utiliza două metode:

1. Aplicarea unei tensiuni continue la bornele supercondensatorului și monitorizarea curentului necesar pentru a menține fixă valoarea acelei tensiuni. Acel curent reprezintă valoarea curentului de pierdere.
2. Încărcarea unui supercondensator la o anumită tensiune continuă și urmată de monitorizarea acestuia o perioadă de timp îndelungată (indicat 72 ore) în circuit



deschis. Autodescărcarea este dată de diferența dintre valoare maximă a tensiunii înainte de a fi lăsat supercondensatorul în circuit deschis și valoarea tensiunii după perioada de monitorizare  $[\Delta V]$  [5].

### **5.1. Determinarea curentului de pierdere (prima metodă)**

Etapele privind realizarea testului pentru măsurarea curentului de pierdere sunt următoarele:

a. Încărcarea supercondensatorului cu un curent constant (1 A – valoarea folosită în experimentele mele a curentului de încărcare - descărcare) până la tensiunea maximă de 2,5 V în cazul supercondensatoarelor de 22 F, respectiv 2,7 V în cazul supercondensatorului de 200 F.

b. Procedul efectuat reprezintă practic menținerea supercondensatoarelor la tensiunea maximă un timp îndelungat (în cazul testelor realizate am monitorizat timp de 12 ore) până când valoarea curentului scade considerabil și apoi rămâne constantă. Această valoare la care curentul se stabilizează reprezentând valoarea curentului de pierdere [22].

c. Descărcarea supercondensatoarelor cu aceeași valoare a curentului cu care au fost încărcate (1 A).

Toate testele au fost realizate la diferite temperaturi, iar pentru aceasta a fost nevoie de utilizarea unei camere (incinte) climatice.

### **5.2. Determinarea autodescărcării (a doua metodă)**

Etapele privind realizarea testului pentru măsurarea autodescărcării sunt următoarele:

a. Încărcarea cu un curent constant (1 A - valoarea folosită în experimentele mele a curentului de încărcare - descărcare) până la tensiunea maximă de 2,5 V în cazul supercondensatoarelor de 22 F, respectiv 2,7 V în cazul supercondensatorului de 200 F.

b. Menținerea supercondensatoarelor la tensiunea maximă timp de 30 de minute pentru realizarea stabilizării.

c. Monitorizarea supercondensatoarelor lăsate în circuit deschis pentru maxim 72 ore.

d. Descărcarea supercondensatoarelor cu aceeași valoare a curentului cu care au fost încărcate (1 A).

Și în cazul acestui experiment toate testele au fost realizate la diferite temperaturi, iar pentru aceasta a fost nevoie de utilizarea unei camere climatice.

### **5.3. Rezultate experimentale**

Pentru această lucrare au fost supuse testării două tipuri de supercondensatoare utilizând ambele metode descrise anterior. Cele două tipuri de supercondensatoare au o capacitate de 22 F, respectiv 200 F și o tensiune nominală de 2,5 V, respectiv 2,7 V.

În cazul supercondensatorului de 22 F am testat două componente, una nouă (neutilizată) și cealaltă utilizată în diferite experimente anterioare pentru a identifica pierderile în ambele situații și a observa ceea ce se întâmplă cu un supercondensator în timp, după ce a fost supus mai multor teste.

### 5.3.1. Rezultate obținute prin prima metodă - curentul de pierdere

Utilizând această metodă s-a putut determina valoarea curentului de pierdere pentru cele trei supercondensatoare testate de 200 F, 22 F utilizat și 22 F nou. Acestea au fost ținute la tensiunea maximă de 2,7 V, respectiv 2,5 V pentru o perioadă de aproximativ 12 ore, până când valoarea curentului a rămas constantă, aceasta valoare reprezentând valoarea curentului de pierdere.

*Tab. 5. 1 Valorile curentului de pierdere obținute prin prima metodă la diferite valori ale temperaturii.*

Curentul de pierdere [mA]	Temperatura [°C]	EDLC – 200 F	EDLC – 22 F - utilizat	EDLC – 22 F - nou
$I_{lc}$	-20	1,041	0,058	0,345
	0	1,225	0,065	0,050
	25	3,879	1,015	0,548
	50	8,459	1,371	1,286

### 5.3.2. Rezultate obținute prin cea de-a doua metodă – autodescărcare

Utilizând cea de-a doua metodă s-a putut determina autodescărcarea supercondensatoarelor testate pentru un timp îndelungat (max. 47 ore). În cazul testării componentelor la -20 °C au fost întâmpinate unele dificultăți deoarece sistemul de stocare a datelor a prezentat oarecare erori, iar monitorizarea a fost realizată doar pentru 24 ore.

*Tab. 5. 2 Valorile tensiunii de autodescărcare obținute prin metoda a doua pentru supercondensatorul de 200 F / 2,7 V.*

Temperatura [°C]	Timpul autodescărcării [ore]		Autodescărcarea supercondensatorului de 200 F – $\Delta V$ [V]	
-20	24	-	0,163	-
25	24	43	0,625	0,728
50	24	47	0,681	0,854

## Capitolul 6

### Investigații privind spectroscopia de impedanță electrochimică asupra diferitelor tipuri de supercondensatoare

În capitolul 6 sunt prezentate cercetări asupra a trei supercondensatoare, respectiv 5 F, 10 F și respectiv 22 F. Acesta este un studiu rar publicat, majoritatea determinărilor EIS fiind în intervalul de până la 1 F și consider că determinările EIS pentru capacități mai mari ar trebui să fie cunoscute comunității. Pentru a verifica precizia datelor experimentale obținute prin metoda spectroscopiei de impedanță electrochimică, am utilizat, pe de-o parte, o altă metodă directă (DM), electronică, cu aparate performante, obținând date experimentale care au fost prelucrate pentru a determina parametrii supercondensatoarelor, iar din punct de vedere teoretic datele au fost verificate cu ajutorul relațiilor Kramers-Kronig.

#### 6.1. Metoda spectroscopiei de impedanță electrochimică (EIS) și metoda directă (DM)

Spectroscopia impedanței electrochimice (EIS) este o metodă de investigare utilizată în sistemele electrochimice. Aceasta este implementată de obicei într-un potențostat și presupune suprapunerea unui semnal sinusoidal cu o amplitudine mică (5-10 mV) peste o tensiune continuă și monitorizarea magnitudinii și a unghiului de fază a curentului alternativ rezultat. Impedanța rezultată este reprezentată de obicei ca o cantitate complexă, ca în ecuația (6. 1):

$$Z(\omega) = Z'(\omega) + jZ''(\omega) \quad (6. 1)$$

Datele EIS pot fi reprezentate în planul complex ca așa-numitele grafice Nyquist. Partea reală  $Z'$  și negativul părții imaginare  $-Z''$  a impedanței sunt reprezentate în planul complex,  $Z'$  fiind pe axa OX și  $-Z''$  pe axa OY, rezultatul fiind un grafic având frecvența ca și parametru.

Utilizând metoda spectroscopiei de impedanță electrochimică, acest capitol prezintă rezultatele a trei cercetări cu privire la:

- a. Dependența capacității față de tensiunea aplicată la bornele supercondensatoarelor.
- b. Influența temperaturii asupra părții reale  $Z'$ , respectiv părții imaginare  $Z''$  a impedanței pentru trei tipuri de supercondensatoare.
- c. Implementarea relațiilor matematice Kramers-Kronig asupra datelor experimentale obținute în cadrul cercetării anterioare.

### 6.1.1. Dependența capacității față de tensiunea aplicată la bornele supercondensatoarelor utilizând metoda spectroscopiei de impedanță electrochimică

#### Metoda de măsurare

Așa cum am menționat anterior, datele obținute prin metoda spectroscopiei de impedanță electrochimică (EIS) au fost comparate cu alt set de date experimentale obținut prin utilizarea unei metode electronice, numită local metoda directă (DM).

#### Rezultate experimentale

Rezultatele se bazează pe măsurătorile efectuate pe două tipuri de supercondensatoare: 22 F și 5 F ce au o tensiune maximă de 2,5 V, respectiv 5,4 V. Măsurătorile obținute prin metoda directă au fost efectuate în conformitate cu standardul IEC 62391 [9].

Valorile capacității obținute la diferite tensiuni pentru supercondensatorul de 22 F prin metoda directă (DM) de măsurare și, respectiv prin metoda spectroscopiei de impedanță electrochimică (EIS) sunt prezentate în Tab. 6. 1.

Pentru obținerea valorilor capacității în funcție de tensiunea aplicată la borne prin metoda spectroscopiei de impedanță electrochimică am utilizat fitarea datelor experimentale cu ajutorul circuitului echivalent simplu Randles asociat modelului Helmholtz prezentat în cadrul tezei.

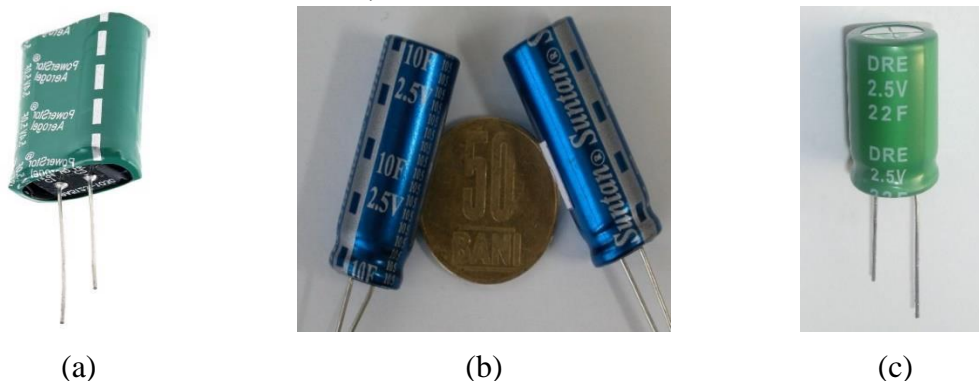
**Tab. 6. 1** Valorile capacității în funcție de tensiunea de lucru pentru supercondensatorul de 22 F.

EDLC-22 F	EIS	DM
$V_{\max}$ [V]	C [F]	C [F]
2,5	24,9	25,42
2	22,3	23,14
1,6	21,4	22,01
1,2	20	20,48
0,8	18,7	19,49
0,4	17,8	17,89

### 6.1.2. Influența temperaturii asupra părții reale $Z'$ , respectiv părții imaginare $Z''$ a impedanței pentru trei tipuri de supercondensatoare

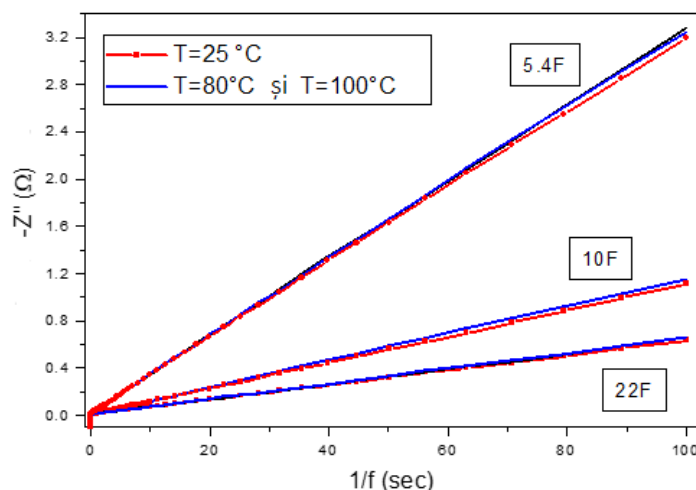
Pentru această cercetare am investigat comportamentul a 3 tipuri de supercondensatoare cu valori diferite ale capacității: 5 F, 10 F [48] și 22 F (a se vedea Fig. 6. 11) la diferite valori ale temperaturii. Scopul acestei cercetări a fost de a observa comportamentul la temperaturi diferite al acestor componente cu ajutorul EIS. Supercondensatoarele au fost ținute la tensiunea maximă timp de 30 minute, timp optim recomandat în standardele internaționale pentru obținerea stabilizării, după ce

acestea au atins pragul tensiunii maxime de lucru specifică fiecărei componente în parte. Echipamentul utilizat pentru realizarea măsurătorilor a fost un potențostat. Toate datele au fost monitorizate și tabelate de software-ul specializat Nova.



**Fig. 6. 11** Supercondensatoarele testate : (a).5 F / 5,4 V, (b).10 F / 2,5 V, (c).22 F / 2,5 V.

Variația negativului părții imaginare a impedanței în funcție de timp la diferite valori ale temperaturii (~ 24 °C - temperatura ambiantă, 80 °C și 100 °C) pentru supercondensatoarele supuse testării este prezentată în Fig. 6. 13. Variația temperaturii nu afectează în mod surprinzător valorile capacității celor trei supercondensatoare.



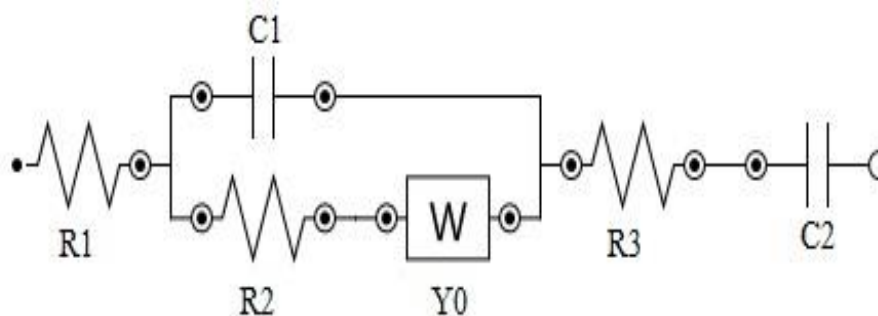
**Fig. 6. 13** Graficul părții imaginare negative a impedanței în funcție de timp.

Pentru calculul valorii capacității am folosit ecuația (6.2) prezentată în cadrul tezei și am luat în considerare punctele din grafic care corespund timpului de 20 secunde, respectiv 100 secunde și am calculat panta dreptei în cazul graficului obținut. Rezultatele sunt prezentate în Tab. 6.5.

**Tab. 6. 5** Valorile calculate ( $C_{calc}$ ) și fitate ( $C_{fit}$ ) ale capacității obținute pentru supercondensatoarele testate.

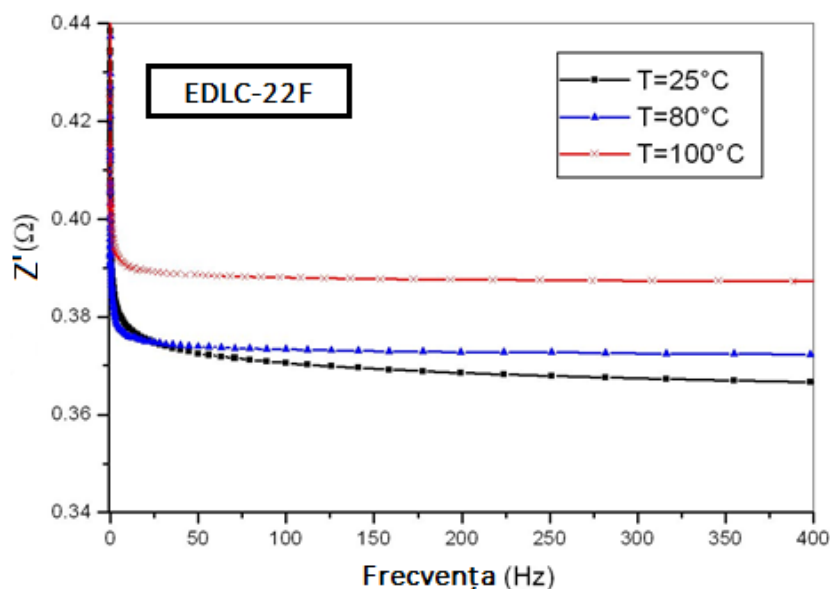
Temperatura [°C]	EDLC-5 F-5,4 V		EDLC-10 F-2,5 V		EDLC-22 F-2,5 V	
	$C_{calc}$ [F]	$C_{fit}$ [F]	$C_{calc}$ [F]	$C_{fit}$ [F]	$C_{calc}$ [F]	$C_{fit}$ [F]
~ 24	5,04	5,18	14,34	15,01	25,35	27,83
80	4,96	5,18	13,96	14,31	24,43	26,22
100	4,88	5,12	14,07	14,33	24,32	25,89

Pentru fitarea datelor experimentale obținute cu ajutorul spectroscopiei de impedanță electrochimică am dezvoltat un circuit pornind de la circuitul echivalent simplificat Randles. Acest circuit este prezentat în figura de mai jos:



**Fig. 6. 15** Circuitul echivalent utilizat pentru fitarea măsurărilor EIS.

Variația părții reale a impedanței în funcție de diferitele valori ale frecvenței pentru supercondensatorul de 22 F este prezentată în Fig. 6. 14. Se poate observa că valorile părții reale ale impedanței sunt diferite la cele trei temperaturi testate.



**Fig. 6. 14** Partea reală a impedanței în funcție de frecvență la diferite valori ale temperaturii.

### 6.1.3. Implementarea relațiilor matematice Kramers-Kronig asupra datelor experimentale obținute în cadrul cercetării anterioare

Utilizându-mă de datele experimentale obținute cu ajutorul spectroscopiei de impedanță electrochimică și prezentate în cadrul cercetării realizată în subcapitolul 6.1.1 al tezei am probat, ajutându-ne de cele două relații matematice Kramers-Kronig, veridicitatea datelor măsurate. Cele două relații sunt prezentate mai jos:

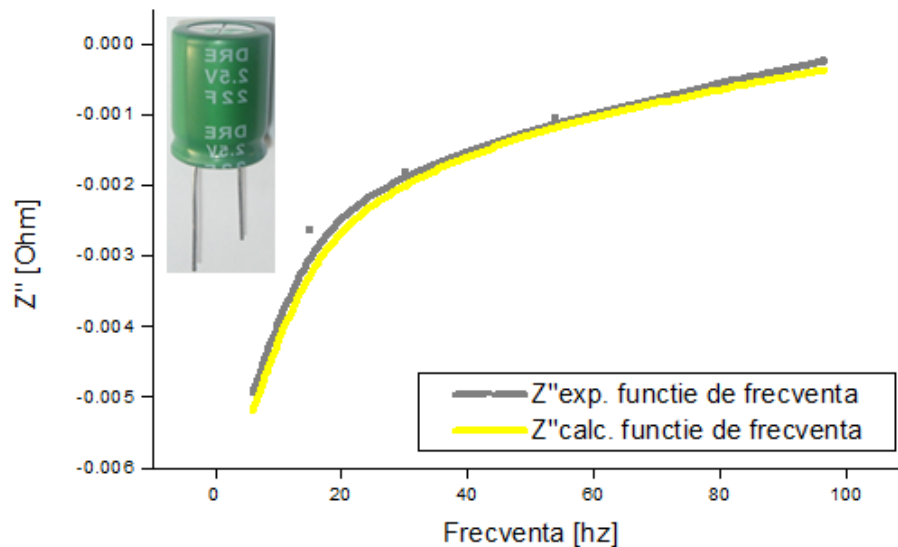
$$Z_{re}(\omega) - Z_{re}(0) = \frac{2\omega}{\pi} \int_0^{\infty} \frac{\frac{\omega}{x} Z_{im}(x) - Z_{im}(\omega)}{x^2 - \omega^2} dx \quad (6.2)$$

$$Z_{im}(\omega) = \frac{2\omega}{\pi} \int_0^{\infty} \frac{Z_{re}(x) - Z_{re}(\omega)}{x^2 - \omega^2} dx \quad (6.3)$$

Unde  $\omega$  este frecvența unghiulară și  $x$  variabila de integrare.

Aceste două ecuații stabilesc relația dintre partea reală și cea imaginară a impedanței complexe a supercondensatorului testat. Acestea sunt utilizate pentru a proba corectitudinea datelor experimentale obținute cu ajutorul EIS deoarece există situații în care, prin utilizarea acestei metode obținem valori negative sau valori de ordinul Teraohms pentru rezistențe sau în cazul diagramei Nyquist obținem cercuri distorsionate. Aplicabilitatea acestor ecuații constă în determinarea părții reale a impedanței atunci când se cunoaște partea imaginară din datele măsurate sau invers.

În urma aplicării relațiilor matematice Kramers-Kronig, într-un interval finit al frecvențelor de lucru, se poate observa, conform graficului obținut în cazul supercondensatorului testat de 22 F prezentat mai jos, că putem folosi ca și metodă de calcul aceste relații pentru a verifica acuratețea datelor obținute experimental cu ajutorul spectroscopiei de impedanță electrochimică.



**Fig. 6. 20**  $Z''(\omega)$ -valorile măsurate și calculate la  $T = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$  pentru supracondensatorul de 22 F în funcție de frecvență.

## Capitolul 7

### Tehnologia de realizare a unei celule (supercondensator) de tip Pouch și testarea acesteia

În cadrul acestui capitol este prezentată tehnologia de realizare a unui supercondensator, celulă de tip Pouch. Această celulă a fost realizată împreună cu

echipa din cadrul Institutul Național de Cercetare-Dezvoltare pentru Tehnologii Criogenice și Izotopice (ICSI), Râmnicu Vâlcea.

## **7.1. Tipuri constructive de supercondensatoare în cadrul ICSI, Râmnicu Vâlcea**

În cadrul Institutului de Tehnologii Criogenice și Izotopice din Râmnicu Vâlcea este posibilă realizarea a două tipuri de supercondensatoare din punct de vedere constructiv, după cum urmează:

- Supercondensator de tip cilindric 18650
- Celula (supercondensator) de tip Pouch.

## **7.2. Metoda de realizare a celulei (supercondensatorului) de tip Pouch**

### **7.2.1. Supercondensator vs. Baterie**

Supercondensatoarele și bateriile sunt dispozitive destinate stocării de energie necesară în diferite aplicații. Astfel, de-a lungul timpului utilizarea unui asemenea dispozitiv a devenit indispensabilă. În funcție de aplicația în care se utilizează se poate opta pentru utilizarea unui sistem bazat pe supercondensatoare sau baterii sau un sistem hibrid baterie-supercondensator. Pentru a identifica corect necesitatea aplicației din punct de vedere al sistemului de stocare trebuie să cunoaștem foarte bine funcționarea, dar și avantajele și dezavantajele pe care le prezintă fiecare dispozitiv în parte.

Pentru realizarea supercondensatorului s-a utilizat linia pilot din cadrul laboratorului ICSI – ROM-EST destinată producerii bateriilor Litiu-Ion bazându-ne pe asemănările existente din punct de vedere constructiv între aceste două componente. Părțile componente ale acestora sunt aceleași, diferența constând în materialele din care acestea sunt realizate și în procesul de funcționare al acestora care este complet diferit. De asemenea, o serie de parametri caracteristici îi diferențiază. Spre exemplu, rezistența echivalentă serie prezintă o valoare mai mică în cazul supercondensatorului, iar numărul de cicluri de încărcare-descărcare este semnificativ mai mare, dar să nu uităm faptul că tensiunea maximă de lucru pe o singură celulă este mai mare la bateria Litiu-Ion. Totodată, fenomenul autodescărcării este mai puțin pronunțat în cazul bateriei, iar densitatea de energie este ceva mai mare comparativ cu supercondensatorul.

### **7.2.2. Caracteristicile tehnice ale celulei de tip Pouch**

În cadrul acestui subcapitol sunt prezentate dimensiunile electrodului, dar și informații cu privire la cantitatea de material depus pe folia de aluminiu utilizată



pentru obținerea electrozilor. De asemenea, sunt prezentate și dimensiunile carcusei, dimensiuni stabilite în concordanță cu dimensiunile electrozilor.

### 7.2.3. Materiale utilizate în realizarea supercondensatorului, celulă de tip Pouch

**Compoziție electrod:** - Amestec: CB - Carbon black (95 %), PVdF - Polyvinylidene fluoride (5 %), NMP - N -Methyl-2-pyrrolidone.

**Separator:** - Celgard 2325 (trei straturi, PP (polipropilenă)-PE (polietilenă)-PP (polipropilenă), 25  $\mu\text{m}$ ).

**Electrolit:** - BMI.BF4 - 1-Butyl-3-methylimidazolium tetrafluoroborate  $\geq 97,0$  % (HPLC) (Sigma-Aldrich) [38].

### 7.2.4. Procesul de realizare al celulei de tip Pouch

Acest subcapitol prezintă în detaliu etapele procesului de realizare al celulei (supercondensatorului) de tip Pouch. Sunt prezentate detalii cu privire la procesul de obținere al materialului utilizat pentru depunerea electrozilor, modalitatea în care au fost tăiați și pliați electrozii împreună cu separatorul, sigilarea capsulei, dar și procedeul prin care electrolitul a fost introdus în interiorul capsulei. Pentru realizarea celulei (supercondensatorului) de tip Pouch au fost utilizați zece electrozi, opt cu depunere față-verso și doi cu depunere doar față. Supercondensatorul obținut este prezentat în figura de mai jos:



*Fig. 7. 10 Celula de tip Pouch realizată în laboratorul ROM-EST, ICSI, Râmnicu Vâlcea.*

## 7.3. Metoda de testare a celulei (supercondensatorului) de tip Pouch și rezultate experimentale obținute în urma testării

Cercetarea are ca scop obținerea a cât mai multe informații legate de supercondensatorul creat. Mai exact, obținerea prin calcule a valorilor celor mai importanți parametri (tensiune de autodescărcare, rezistența echivalentă serie, capacitatea, densități de putere și de energie) și de asemenea, reprezentarea grafică a

acestora ne vor convinge dacă alegerea utilizării ca electrolit a unui lichid ionic a fost o alegere bună sau nu.

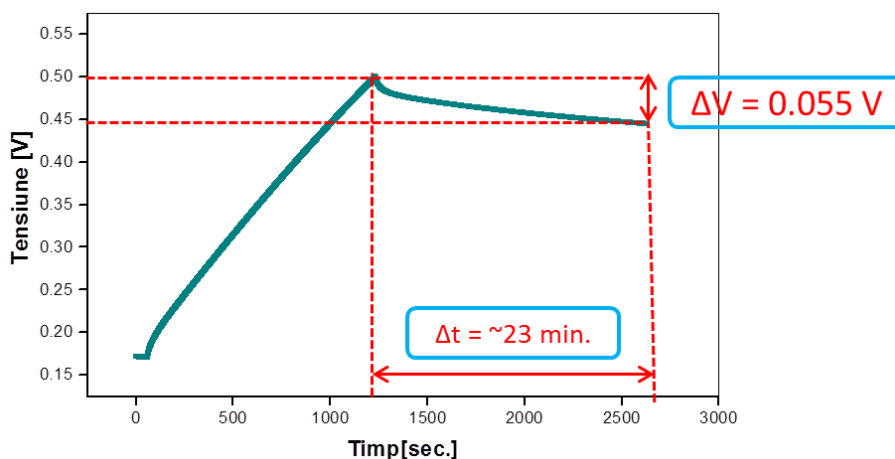
### 7.3.1. Procedura de testare a celulei realizate

Testarea celulei (supercondensatorului) de tip Pouch realizată a constat în încărcarea acesteia cu diferite valori ale curenților de încărcare crescând treptat valoarea tensiunii maxime de lucru. Am decis ca să supunem celula de tip Pouch la aceste teste prin încărcări succesive pornind de la 20 mV valoarea tensiunii și 10  $\mu\text{A}$  valoarea curentului de încărcare și crescând progresiv aceste valori. Am recurs la acest procedeu pentru a nu depăși pragul maxim al tensiunii și pentru a vedea ce se întâmplă pe parcursul testelor cu celula proaspăt realizată.

### 7.3.2. Rezultate experimentale

#### *Determinarea principalilor parametri ai celulei de tip Pouch*

- *Monitorizarea autodescărcării în diferite cazuri*



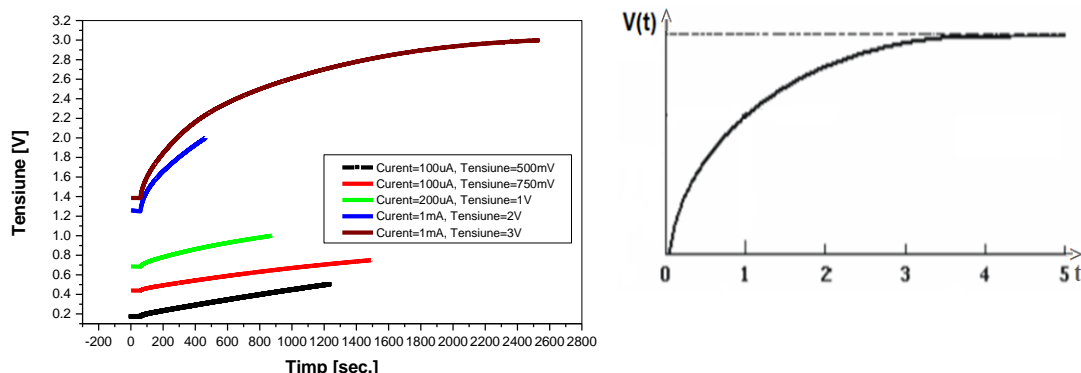
**Fig. 7. 15** Monitorizarea încărcării și a autodescărcării celulei de tip Pouch la 500 mV, 100  $\mu\text{A}$ .

În Fig. 7. 15 este exemplificată încărcarea cu un curent de 100  $\mu\text{A}$  până la tensiunea maximă de 500 mV, încărcare ce se realizează în aproximativ 20 de minute. După o monitorizare în circuit deschis a celulei de 23 de minute la bornele acesteia se observă o autodescărcare de 55 mV. Această valoare reprezintă aproximativ 10% din valoarea totală a tensiunii maxime de 500 mV aplicată la bornele supercondensatorului nostru. Din calculele realizate, cea mai mare parte a autodescărcării se produce în primele 5 minute, respectiv 30 mV.

- *Încărcarea supercondensatorului la diferite valori ale tensiunii de lucru*

În Fig. 7. 20 este exemplificată încărcarea supercondensatorului la mai multe valori ale tensiunii, respectiv 500 mV, 750 mV, 2 V, 3 V. După cum se poate observa, forma graficului  $V(t)$  capătă forma de încărcare a unui supercondensator ideal abia la

valoarea tensiunii de 3 V. Acest aspect explică capabilitatea electrolitului utilizat, fiind un lichid ionic, de a permite încărcarea cu o tensiune mai mare sau egală cu 3 V.



**Fig. 7.20** Încărcarea supercondensatorului realizat la diferite valori ale tensiunii vs. graficul  $V(t)$  al încărcării ideale a unui condensator [40].

Valoarea capacității supercondensatorului obținută în urma calculelor a fost de 95,76 mF, iar rezistența echivalentă serie obținută prin determinarea acesteia din datele experimentale cu ajutorul graficului Nyquist are valoarea de 581,28 m $\Omega$ .

## Capitolul 8

### Concluzii

#### 8.1. Rezultate obținute

Capitolul 2: Cercetări asupra proceselor electrochimice ce se produc în interiorul supercondensatorului și asupra realizării stratului de sarcină electrică.

Capitolul 3: Cercetări asupra diferitelor materiale pentru electrozi, electroliți și separator utilizate în realizarea supercondensatorului.

Capitolul 4: Identificarea rezultatelor experimentale asupra a două tipuri de supercondensatoare cu capacitățile de 22 F, respectiv 200 F după cum urmează:

- evidențierea diferențelor dintre valoarea capacității obținută experimental în cazul conexiunilor serie și paralel de două sau trei supercondensatoare și valoarea capacității pentru aceleași conexiuni serie sau paralel obținută prin calcul teoretic. Experimentele au fost realizate la diferite temperaturi (-25 °C, 0 °C, ~30 °C și 70 °C)
- evidențierea influențelor timpului de stabilizare de 0 minute, respectiv 30 minute asupra capacității și rezistenței echivalente serie în cazul conexiunilor serie și paralel de trei supercondensatoare de 22 F.
- obținerea valorilor capacităților, rezistenței echivalente serie și a puterii pentru diferite valori ale curentului de încărcare-descărcare.

Capitolul 5: Determinarea curentului de pierdere la diferite valori ale temperaturii pentru două tipuri de supercondensatoare cu capacitățile de 22 F, respectiv 200 F. Determinarea autodescărcării la diferite valori ale temperaturii pentru două tipuri de supercondensatoare cu capacitățile de 22 F, respectiv 200 F.

Capitolul 6: Identificarea dependenței capacității față de tensiunea de lucru pentru două tipuri de supercondensatoare (5 F / 5,4 V și 22 F / 2,5 V) cu ajutorul a două metode, o metodă electronică și cu ajutorul spectroscopiei de impedanță electrochimică.

Identificarea influenței temperaturii asupra părții reale  $Z'$ , respectiv părții imaginare  $Z''$  a impedanței pentru trei tipuri de supercondensatoare (5 F / 5,4 V, 10 F / 2,5 V, 22 F / 2,5 V).

Capitolul 7: Prezentarea detaliată a procesului de realizare a celulei de tip Pouch. Testarea supercondensatorului, celulă de tip Pouch în condiții de laborator până la tensiunea maximă de 3 V.

## 8.2. Contribuții originale

- Determinarea parametrilor principali precum capacitatea, rezistența echivalentă serie, puterea disipată pentru supercondensatoare de 22 F și 200 F luând în calcul variațiile curentului de încărcare-descărcare. Metodele de determinare și rezultatele obținute sunt prezentate în capitolul 4 și publicate în [14].
- Determinarea capacității atât în mod teoretic, cât și experimental a conexiunilor serie și paralel de două supercondensatoare de 22 F, respectiv 200 F. Testele au fost realizate la diferite valori ale temperaturii, iar rezultatele obținute sunt detaliate în capitolul 4 și publicate în [8].
- Influența timpului de stabilizare de 0 minute, respectiv de 30 minute asupra capacității și rezistenței echivalente serie pentru conexiunile serie și paralel de trei supercondensatoare de 22 F. Rezultatele obținute sunt detaliate în capitolul 4 al tezei și publicate în [14].
- Prezentarea detaliată în capitolul 5 al tezei a două metode de determinare a curentului de pierdere. Metodele au fost publicate în [12].
- Realizarea unor măsurători privind determinarea curentului de pierdere și a autodescărcării asupra a două supercondensatoare de 22 F, unul nou și celălalt utilizat pentru a scoate în evidență eventualele diferențe de valori apărute în timp asupra parametrilor menționați. Aceste experimente se găsesc detaliate în capitolul 5 al tezei și au fost publicate în [12].
- Proiectarea și realizarea unui circuit specializat (sarcină activă), în condiții laborator pentru descărcarea supercondensatoarelor până la valoarea de 0 V a tensiunii. Rezultatele sunt publicate în [1].
- Identificarea variației capacității în funcție de tensiunea maximă de lucru cu ajutorul a două metode, o metodă electronică și metoda spectroscopiei de impedanță electrochimică pentru două supercondensatoare de 22 F / 2,5 V și 5 F / 5,4 V. Realizarea comparației rezultatelor obținute în urma aplicării celor două metode. Cercetarea este prezentată în capitolul 6 al tezei și publicată în [11].
- Dezvoltarea unui circuit echivalent al supercondensatorului plecând de la circuitul simplificat Randles. Acest circuit echivalent dezvoltat a fost utilizat pentru fitarea datelor experimentale obținute cu ajutorul spectroscopiei de impedanță electrochimică în cazul a trei supercondensatoare (5 F / 5,4 V, 10 F / 2,5 V, 22 F / 2,5 V). Circuitul realizat este prezentat în capitolul 6 și publicat în [7].

- Analiza comparativă realizată asupra a trei tipuri de supercondensatoare (5 F / 5,4 V, 10 F / 2,5 V și 22 F / 2,5 V) privind valorile capacității obținute prin calculul acesteia din formula pantei drepte și valorile capacității obținute în urma fitării datelor experimentale cu ajutorul circuitului echivalent dezvoltat. Cercetarea și rezultatele obținute sunt prezentate în capitolul 6 și publicate în [7].
- Implementare relațiilor matematice Kramers-Kronig asupra datelor experimentale obținute prin spectroscopie de impedanță electrochimică. Metoda de aplicare a relațiilor Kramers-Kronig este prezentată în capitolul 6 și publicată în [8].
- Prezentarea unor comparații între valorile calculate cu ajutorul relațiilor matematice Kramers-Kronig și datele obținute experimental la diferite valori ale temperaturii atât negative, cât și pozitive pentru două supercondensatoare de 5 F / 5,4 V, respective 22 F / 2,5 V. Analiza comparativă este prezentată în capitolul 6 și publicată în [8].
- Realizarea unui supercondensator, celulă de tip Pouch cu ajutorul unor echipamente existente în România. Electroliul utilizat pentru realizarea supercondensatorului este un lichid ionic. Întregul proces de realizare a supercondensatorului este prezentat în capitolul 7 al tezei și publicat în [17].
- Realizarea de teste asupra supercondensatorului, celulă de tip Pouch prin creșterea progresivă a tensiunii maxime de lucru și a curentului de încărcare până la tensiunea maximă de 3 V, respectiv 1 mA valoarea curentului de încărcare. Procesul de testare al supercondensatorului este prezentat în capitolul 7 al tezei și publicat în [17].

### 8.3. Lista lucrărilor originale

1. Ionescu, C., Vasile, A., Negroiu, R., *Accurate modeling of supercapacitors for DC operation regime*, **2015 IEEE 21st International Symposium for in Design and Technology in Electronic Packaging (SIITME)**, pp. 303-306, Conference Location: Brașov, Romania, 22-25 Oct. 2015, **DOI:** 10.1109/SIITME.2015.7342344, **WOS:** 000377765500056, ISBN:978-1-5090-0332-7, ISSN: 2641-287X, Publisher: IEEE.
2. Alexandru Vasile, Rodica Negroiu, Niculina Badalan, *Research and development of a system for measuring electrical parameters of EDLC*, **2015 IEEE 21th International Symposium for Design and Technology in Electronic Packaging (SIITME)**, Brasov 2015, pp. 353-356, **DOI:** 10.1109/SIITME.2015.7342352, **WOS:**000377765500064, ISBN 978-1-5090-0332-7, Publisher: IEEE.
3. R Negroiu, N Bădălan, Al Vasile, C Marghescu; *A research of the characteristics of materials used in the construction of EDLCs*, **2015 IEEE 21th International Symposium for Design and Technology in Electronic Packaging (SIITME)**, Brasov 2015; Date of Conference:22-25 Oct. 2015; Page(s):95-98; Location :Brasov, Romania, **DOI:** 10.1109/SIITME.2015.7342302, **WOS:**000377765500014, ISBN 978-1-5090-0332-7, Publisher: IEEE.
4. R. Negroiu, P. Svasta, Al. Vasile, C. Ionescu, C. Marghescu, *Comparison between Zubieta Model of Supercapacitors and their Real Behavior*, **2016 IEEE 22nd International Symposium for Design and Technology in Electronic**

**Packaging (SIITME)**, 20-23 October, 2016 Băile Felix, Oradea, Romania, **WOS:** 000390557400041, ISBN:978-1-5090-4446-7, Publisher: IEEE.

5. Ciprian Ionescu, Alexandru Vasile, Rodica Negroiu, *Investigations on balancing circuits for supercapacitor modules*, **39<sup>th</sup> International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE)**, pag. 521-526, May 18-22, 2016, Location: Pilzen Czech Republic, pp. 18-20, ISSN: 1041-1135, **DOI:** 10.1109/ISSE.2016.7563253, **WOS:** 000387089800103.

6. Ciprian Ionescu, Alexandru Vasile, Norocel Codreanu, Rodica Negroiu, *Comparative studies on dimming capabilities of retrofit LED lamps*, **Advanced Topics in Optoelectronics, Microelectronics and Nanotechnologies VIII**, 100102Z (December 14, 2016), **WOS:** 000391359600107, ISBN:978-1-5106-0424-7; 978-1-5106-0425-4.

7. Rodica Negroiu, Paul Svasta, Ciprian Ionescu, Alexandru Vasile, *Investigation of Supercapacitor's Impedance Based on Spectroscopic Measurements*, **1st PCNS Passive Components Networking Symposium**, Page(s): 56-62, 12-15th Sep 2017, Brno, Czech Republic, ISBN: 978-80-905 768-8-9.

8. R Negroiu, C Ionescu, P Svasta, A Vasile, *Influence of temperature on supercapacitors behavior in series/parallel connections*, **2017 IEEE 23rd International Symposium for Design and Technology in Electronic Packaging (SIITME)**, Page(s): 367-370, Location: Constanta, Romania, **WOS:** 000428032300078, **DOI:** 10.1109/SIITME.2017.8259927, ISBN:978-1-5386-1626-0, Publisher: IEEE.

9. IB Brezeanu, PA Paraschivoiu, R Negroiu, LA Chiva, *Applications of Kramers-Kronig relations*, **2017 IEEE 23rd International Symposium for Design and Technology in Electronic Packaging (SIITME)**, Page(s): 82-85, Location: Constanta, Romania, **DOI:** 10.1109/SIITME.2017.8259862, **WOS:** 000428032300013, ISBN:978-1-5386-1626-0, Publisher: IEEE.

10. P Svasta, R Negroiu, Al Vasile, *Supercapacitors — An alternative electrical energy storage device*, **2017 5th International Symposium on Electrical and Electronics Engineering (ISEEE)**, Page(s): 1-5, Conference Location: Galati, Romania, **DOI:** 10.1109/ISEEE.2017.8170626, **WOS:** 000428234400002, ISBN: 978-1-5386-2059-5, Publisher: IEEE.

11. R Negroiu, P Svasta, C Pirvu, Al Vasile, C Marghescu, *Electrochemical impedance spectroscopy for different types of supercapacitors*, **2017 40th International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE)**, Page(s): 1-4, May 10-14, 2017, Location: Sofia, Bulgaria, **DOI:** 10.1109/ISSE.2017.8000889, **WOS:** 000426973000012, ISBN:978-1-5386-0582-0, Publisher: IEEE.

12. R Negroiu, P Svasta, Al Vasile, C Ionescu, *Methods for Determining the Leakage Current of Supercapacitors*, **2018 41st International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE)**, Zlatibor, Serbia, 2018, pp. 1-4, May 16-20, 2018, **DOI:** 10.1109/ISSE.2018.8443685, **WOS:** 000449866600059, Electronic ISSN: 2161-2536.

13. A. Vasile, N. Codreanu, M.-O. Dima, C. Ionescu, R. Negroiu, P. Svasta, M.Pantazica, M.Jurba, *Fast Control System and Algorithms for Stabilizing of Mobile Platforms*, **2018 41st International Spring Seminar on Electronics Technology**

(ISSE), Zlatibor, 2018, pp. 1-5, May 16-20, 2018, DOI: 10.1109/ISSE.2018.8443669, Electronic ISSN: 2161-2536, WOS:000449866600043.

14. Rodica Negroiu, Paul Svasta, Alexandru Vasile, Ciprian Ionescu, Popescu Ileana Iulia, *The Performance of Supercapacitors' Main Parameters According to Topology of the Electrical Circuits in Which They are Used*, **2018 IEEE 24th International Symposium for Design and Technology in Electronic Packaging (SIITME)**, Iași, 2018, pp. 187-190, DOI: 10.1109/SIITME.2018.8599214, WOS: 000466960400038, ISBN:978-1-7281-7506-5, ISSN: 2641-287X .

15. Irina Bristena Bacis (Vasile); Iulia Ileana Popescu; Rodica Negroiu (Pavel), *Methods of ensuring the quality of intelligent optical fiber telecommunication networks*, **Advanced Topics in Optoelectronics, Microelectronics and Nanotechnologies-ATOM 2018**, Constanța, Vol. SPIE no. 9658, ISBN 9781628413235823, Proc. SPIE 10977, 1097718 (31 December 2018), DOI: 10.1117/12.2324874, WOS: 000458717900043.

16. MM Chițu, Al Vasile, R Negroiu, *Evaluation of brushless DC motors functionality in automotive electronic systems*, **Advanced Topics in Optoelectronics, Microelectronics and Nanotechnologies-ATOM 2018**, Constanța, Vol. SPIE no. 9658, ISBN 9781628413235823, Proc. SPIE 10977, 1097718 (31 December 2018); DOI: 10.1117/12.2325846, WOS: 000458717900110.

17. R Negroiu, P Svasta, Al Vasile, C Ionescu, MR Buga, *Realization and Testing of a Supercapacitor, Pouch Type Cell*, **2020 IEEE 26th International Symposium for Design and Technology in Electronic Packaging (SIITME)**, 2020, pp. 71-74, DOI: 10.1109/SIITME50350.2020.9292280, WOS: 000651085100012, ISBN:978-1-7281-7506-5, ISSN: 2641-287X

18. Alexandru Vasile, Irina Bristena Bacîș, Rodica Cristina Negroiu, *High reliability hybrid power supply systems for PON passive and AON active optical communications networks*, **Advanced Topics in Optoelectronics, Microelectronics and Nanotechnologies X**, 2020, volum 11718, DOI: 10.1117/12.2575685, WOS: 000641147900116, ISBN:978-1-5106-4272-0, ISSN: 0277-786X.

19. R. Negroiu, P. Svasta, M. R. Buga, A. Spinu Zaulet, C. Ungureanu, *Realization and Testing of Electrodes for Supercapacitors based on MOFs and Activated Carbon*, **2021 IEEE 27th International Symposium for Design and Technology in Electronic Packaging (SIITME)**, October 27-30, 2021, în curs de indexare.

#### 8.4. Perspective de dezvoltare ulterioară

- Extinderea gamei curentului de încărcare - descărcare la valori mai mari și prelucrarea datelor experimentale obținute pentru a verifica dacă se respectă concluziile la care am ajuns în urma cercetării realizate în cadrul tezei.
- Încercări asupra măsurătorilor privind timpul de stabilizare în gama 0-30 min pentru a stabili timpul la care se ajunge la o stabilizare optimă.
- Stabilirea unui rate de autodescărcare a supercondensatorului în timp. Mai exact, după cât timp din momentul lăsării în circuit deschis se produce o oarecare stabilizare (variația în timp a autodescărcării).

- Testarea privind fenomenul de autodescărcare asupra a două supercondensatoare cu electroliți apos și organic și identificarea, prin comparație a avantajelor fiecăruia.
- Investigații asupra impedanței Warburg și, implicit asupra stratului difuz. Modul de formare al acestuia în funcție de natura electrolitului utilizat. Găsirea unui circuit echivalent cât mai compact și mai fiabil pentru fitarea datelor experimentale obținute prin metoda spectroscopiei de impedanță electrochimică.
- Realizarea unui supercondensator cilindric ale cărui proprietăți vor depinde de materialele existente la momentul respectiv.
- Realizarea unor supercondensatoare cu valori diferite ale cantității de material depus pe electrozi și testarea acestora pentru a vedea influența cantității de material depus asupra performanțelor supercondensatoarelor.
- Realizarea de material pentru electrozi variind cantitatea de carbon black utilizată.
- Realizarea de teste asupra supercondensatorului, celulă de tip Pouch, la diferite valori ale temperaturii folosind o cameră climatică.
- Realizarea de teste prin creșterea valorilor tensiunii maxime de încărcarea până la valoarea de 5 V, dacă supercondensatorul va suporta din punct de vedere tehnic.
- Investigații asupra unor electrozi realizați din structuri metalice organice (MOFs) în cadrul Institutului de Cercetare-Dezvoltare pentru Tehnologii Criogenice și Izotropice (ICSI) din Râmnicu Vâlcea și realizarea ulterioară a unor supercondensatoare cu electrozi pe bază de MOF.

## Bibliografie

- [1] Liviu Oniciu, *Chimie fizică. Electrochimie*, editura: Didactică și pedagogie, București, 1977
- [2] <http://www.authorstream.com/Presentation/aSGuest106908-1122746-curs-electrochimie/>
- [3] Aiping Yu, Victor Chabot, and JiuJun Zhang, *ELECTROCHEMICAL SUPERCAPACITORS FOR ENERGY STORAGE AND DELIVERY FUNDAMENTALS AND APPLICATIONS*, CRC Press, 2013.
- [4] Conway, B. E., *Electrochemical Supercapacitors: Scientific Fundamentals and Technological Applications*.
- [5] Svasta, P., Vasile, A., Ionescu, C., Golumbeanu, V., *COMPONENTE ELECTRONICE PASIVE Condensatoare Proprietăți, Construcție, Tehnologie, Aplicații*, Editura Cavallioti, Romania-București, 2013.
- [6] <https://delhipages.live/ro/stiinta/%C8%99tiin%C8%9Ba-pamantului-timp-geologic-%C8%99i-fosile/%C8%99tiin%C8%9Be-ale-pamantului/graphite-carbon>
- [7] <http://www.graphene-uses.com/stretchable-graphene-supercapacitor-power-wearable-electronics/>
- [8] Hui Pan • Jianyi Li • Yuan Ping Feng, *Carbon Nanotubes for Supercapacitor*, *Nanoscale Res Lett* (2010) 5:654–668, DOI 10.1007/s11671-009-9508-2.
- [9] Ali Eftekhari, *Supercapacitors utilising ionic liquids*, *Energy Storage Materials* 9 (2017) 47–69, ELSEVIER, [www.elsevier.com/locate/ensm](http://www.elsevier.com/locate/ensm).
- [10] R Negroiu, C Ionescu, P Svasta, A Vasile, *Influence of temperature on supercapacitors behavior in series/parallel connections*, *Design and Technology in*



- Electronic Packaging (SIITME), 2017 IEEE 23rd International Symposium for, Page(s): 367-370, Location: Constanta, Romania, WOS:000428032300078, DOI: 10.1109/SIITME.2017.8259927, ISBN:978-1-5386-1626-0, Publisher: IEEE.
- [11] R Negroiu, N Bădălan, Al Vasile, C Marghescu; *A research of the characteristics of materials used in the construction of EDLCs*, 2015 IEEE 21st International Symposium for, Brasov 2015; Date of Conference:22-25 Oct. 2015; Page(s):95-98; Location :Brasov, Romania WOS:000377765500014, DOI: 10.1109/SIITME.2015.7342302, ISBN 978-1-5090-0332-7, Publisher: IEEE.
- [12] Yu, Aiping, Chabot, Victor, Zhang, JiuJun, *Electrochemical Supercapacitors for Energy Storage and Delivery Fundamentals and Applications*, CRC Press, ISBN 9781439869895, 2013.
- [13] R Negroiu, P Svasta, Al Vasile, C Ionescu, *Methods for Determining the Leakage Current of Supercapacitors*, 2018 41st International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE), Zlatibor, Serbia, 2018, pp. 1-4, DOI: 10.1109/ISSE.2018.8443685, Electronic ISSN: 2161-2536, WOS:000449866600059.
- [14] C. Breitkopf, K. Swider-Lyons (Eds.), Springer Handbook of Electrochemical Energy, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2017.
- [15] M. Orazem, B. Tribollet, *Electrochemical Impedance Spectroscopy*, Wiley, 2008. Chap. 22.
- [16] R Negroiu, P Svasta, C Pirvu, Al Vasile, C Marghescu, *Electrochemical impedance spectroscopy for different types of supercapacitors*, 2017/5/10, Electronics Technology (ISSE), 2017 40th International Spring Seminar on, Page(s): 1-4, Location: Sofia, Bulgaria, WOS:000426973000012, DOI: 10.1109/ISSE.2017.8000889, ISBN:978-1-5386-0582-0, Publisher: IEEE.
- [17] Rodica Negroiu, Paul Svasta, Ciprian Ionescu, Alexandru Vasile, *Investigation of Supercapacitor's Impedance Based on Spectroscopic Measurements*, 1st PCNS Passive Components Networking Symposium, Page(s): 56-62, 12-15th Sep 2017, Brno, Czech Republic, ISBN: 978-80-905 768-8-9.
- [18] Neluta Ibris, Teodor Visan, *Transformarile Kramers-Kronig*, REV. CHIM. (București) 58, Nr. 2, 2007.
- [19] IB Brezeanu, PA Paraschivoiu, R Negroiu, LA Chiva, *Applications of Kramers-Kronig relations*, Design and Technology in Electronic Packaging (SIITME), 2017 IEEE 23rd International Symposium for, Page(s): 82-85, Location: Constanta, Romania, WOS:000428032300013, DOI: 10.1109/SIITME.2017.8259862, ISBN:978-1-5386-1626-0, Publisher: IEEE.
- [20] R Negroiu, P Svasta, Al Vasile, C Ionescu, MR Buga, *Realization and Testing of a Supercapacitor, Pouch Type Cell*, 2020 IEEE 26th International Symposium for Design and Technology in Electronic Packaging (SIITME), 2020, pp. 71-74, DOI: 10.1109/SIITME50350.2020.9292280
- [21] Rodica Negroiu, Paul Svasta, Alexandru Vasile, Ciprian Ionescu, Popescu Ileana Iulia, *The Performance of Supercapacitors' Main Parameters According to Topology of the Electrical Circuits in Which They are Used*, 2018 IEEE 24th International Symposium for Design and Technology in Electronic Packaging (SIITME), Iași, 2018, pp. 187-190, DOI: 10.1109/SIITME.2018.8599214.
- [22] P Svasta, R Negroiu, Al Vasile, *Supercapacitors—An alternative electrical energy storage device*, 2017 5th International Symposium on Electrical and Electronics

Engineering (ISEEE), Page(s): 1-5, Conference Location: Galati, Romania, WOS:000428234400002, DOI: 10.1109/ISEEE.2017.8170626, ISBN:978-1-5386-2059-5, Publisher: IEEE.