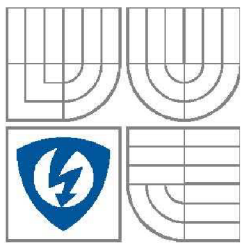




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ

ÚSTAV ELEKTROTECHNOLOGIE

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC TECHNOLOGY

UHLÍKOVÉ MATERIÁLY PRE SUPERKONDENZÁTORY

CARBON MATERIALS FOR SUPERCAPACITORS

BAKALÁRSKA PRÁCA
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

MAROŠ MONCOL'

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

ING. PETR DVOŘÁK

BRNO 2008

Licenční smlouva poskytovaná k výkonu práva užit školní dílo

uzavřená mezi smluvními stranami:

1. Pan/paní

Jméno a příjmení: **Maroš Moncol'**
Bytem: **Banská Bystrica, Mičinská cesta 38, 974 01**
Narozen/a (datum a místo): **8.5.1986, Banská Bystrica**

(dále jen „autor“)

a

2. Vysoké učení technické v Brně

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
se sídlem Údolní 244/53, 602 00 Brno
jejímž jménem jedná na základě písemného pověření děkanem fakulty:
prof. Ing. Radimír Vrba, CSc.
(dále jen „nabyvatel“)

Čl. 1

Specifikace školního díla

1. Předmětem této smlouvy je vysokoškolská kvalifikační práce (VŠKP):
- disertační práce
 - diplomová práce
 - bakalářská práce
 - jiná práce, jejíž druh je specifikován jako
- (dále jen VŠKP nebo dílo)

Název VŠKP: **Uhlíkové materiály pre superkondenzátory**
Vedoucí/ školitel VŠKP: **Ing. Petr Dvořák**
Ústav: **Ústav elektrotechnologie**
Datum obhajoby VŠKP:

VŠKP odevzdal autor nabyvateli v:

- tištěné formě – počet exemplářů 2
- elektronické formě – počet exemplářů 2

2. Autor prohlašuje, že vytvořil samostatnou vlastní tvůrčí činností dílo shora popsané a specifikované. Autor dále prohlašuje, že při zpracovávání díla se sám nedostal do rozporu s autorským zákonem a předpisy souvisejícími a že je dílo dílem původním.
3. Dílo je chráněno jako dílo dle autorského zákona v platném znění.
4. Autor potvrzuje, že listinná a elektronická verze díla je identická.

Článek 2

Udělení licenčního oprávnění

1. Autor touto smlouvou poskytuje nabyvateli oprávnění (licenci) k výkonu práva uvedené dílo nevýdělečně užít, archivovat a zpřístupnit ke studijním, výukovým a výzkumným účelům včetně pořizování výpisů, opisů a rozmnoženin.
2. Licence je poskytována celosvětově, pro celou dobu trvání autorských a majetkových práv k dílu.
3. Autor souhlasí se zveřejněním díla v databázi přístupné v mezinárodní síti
 - ihned po uzavření této smlouvy
 - 1 rok po uzavření této smlouvy
 - 3 roky po uzavření této smlouvy
 - 5 let po uzavření této smlouvy
 - 10 let po uzavření této smlouvy(z důvodu utajení v něm obsažených informací)
4. Nevýdělečné zveřejňování díla nabyvatelem v souladu s ustanovením § 47b zákona č. 111/ 1998 Sb., v platném znění, nevyžaduje licenci a nabyvatel je k němu povinen a oprávněn ze zákona.

Článek 3

Závěrečná ustanovení

1. Smlouva je sepsána ve třech vyhotoveních s platností originálu, přičemž po jednom vyhotovení obdrží autor a nabyvatel, další vyhotovení je vloženo do VŠKP.
2. Vztahy mezi smluvními stranami vzniklé a neupravené touto smlouvou se řídí autorským zákonem, občanským zákoníkem, vysokoškolským zákonem, zákonem o archivnictví, v platném znění a popř. dalšími právními předpisy.
3. Licenční smlouva byla uzavřena na základě svobodné a pravé vůle smluvních stran, s plným porozuměním jejímu textu i důsledkům, nikoliv v tísní a za nápadně nevýhodných podmínek.
4. Licenční smlouva nabývá platnosti a účinnosti dnem jejího podpisu oběma smluvními stranami.

V Brně dne: 29. 5. 2008

.....

Nabyvatel

.....

Autor

Abstrakt:

Projekt se zabývá zkoumáním různých uhlíkových elektrod za účelem dosažení maximálních hodnot kapacity superkondenzátoru. V teoretické části je popsána podstata superkondenzátorů, jejich vlastnosti, principy a srovnání uhlíkových materiálů. V praktické části jsou popsány přípravy elektrod, postup a výsledky měření a jejich vyhodnocení.

Abstract:

This project deals with various carbon electrodes in order to achieve the maximal capacitance of supercapacitors. In a theoretical part of this work, is described physical substance of supercapacitors, energy storage principles and carbon based materials. In an experimental part, is described preparation of electrodes, results and evaluation of measurement.

Klíčová slova:

Superkondenzátor, uhlíková elektróda, cyklická voltametria, nanoštruktúry

Keywords:

Supercapacitor, carbon electrode, cyclic voltammetry, nanostructures

Bibliografická citace díla:

MONCOL, M. *Uhlíkové materiály pro superkondenzátory*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2008. 36 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Petr Dvořák.

Prohlášení autora o původnosti díla:

Prohlašuji, že jsem tuto vysokoškolskou kvalifikační práci vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce, s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury. Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne 29. 5. 2008

.....

Poděkování:

Děkuji vedoucímu bakalářské práce **Ing. Petrovi Dvořákovi** za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mého projektu.

Vysoké učení technické v Brně

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
Ústav elektrotechnologie

POPISNÝ SOUBOR ZÁVEREČNÉ PRÁCE

Autor: Maroš Moncol'
Název závěrečné práce: Uhlíkové materiály pre superkondenzátory
Název závěrečné práce ENG: Carbon materials for supercapacitors
Anotace závěrečné práce:

Projekt se zabývá zkoumáním různých uhlíkových elektrod za účelem dosažení maximálních hodnot kapacity superkondenzátoru. V teoretické části je popsána podstata superkondenzátorů, jejich vlastnosti, principy a srovnání uhlíkových materiálů. V praktické části jsou popsány přípravy elektrod, postup a výsledky měření a jejich vyhodnocení.

Anotace závěrečné práce ENG:

This project deals with various carbon electrodes in order to achieve the maximal capacitance of supercapacitors. In a theoretical part of this work, is described physical substance of supercapacitors, energy storage principles and carbon based materials. In an experimental part, is described preparation of electrodes, results and evaluation of measurement.

Klíčová slova:

Superkondenzátor, uhlíková elektróda, cyklická voltametria, nanoštruktúry

Klíčová slova ENG:

Supercapacitor, carbon electrode, cyclic voltammetry, nanostructures

Typ závěrečné práce: bakalárska
Datový formát elektronické verze: formát pdf
Jazyk závěrečné práce: slovenský
Přidělovaný titul: Bc.
Vedoucí závěrečné práce: Ing. Petr Dvořák

Škola: Vysoké učení technické v Brně
Fakulta: Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií

Ústav: Ústav elektrotechnologie
Studijní program: Elektrotechnika, elektronika, komunikační a řídicí technika
Studijní obor: Mikroelektronika

1 ÚVOD	8
2 TEORETICKÁ ČASŤ	9
2.1 <i>Klasické kondenzátory</i>	9
2.1.1 Princíp	9
2.1.2 Vlastnosti kondenzátorov	10
2.1.3 Druhy kondenzátorov	10
2.2 <i>Superkondenzátory</i>	11
2.2.1 Elektrická dvojvrstva	12
2.2.2 Modely elektrickej dvojvrstvy	13
2.2.3 Výhody a nevýhody superkondenzátorov	16
2.3 <i>Elektródové materiály</i>	16
2.3.1 Štruktúra uhlíku	17
2.3.2 Aktivácia uhlíku	17
2.3.3 Pórovitosť uhlíku	18
2.3.4 Formy uhlíku	19
2.4 <i>Cyklická voltametria</i>	20
3 PRAKTICKÁ ČASŤ	23
3.1 <i>Skúmanie uhlíkových materiálov</i>	23
3.1.1 Príprava elektródy a pasty	23
3.1.2 Príprava merania	24
3.2 <i>Skúmanie aktivačných činiteľov</i>	24
3.2.2 Príprava materiálu GP3893 Vulcan s Caroovou kyselinou	24
3.2.3 Príprava materiálu GP3893 Vulcan s chlorovodíkovou kyselinou	24
3.3 <i>Výpočet Kapacity</i>	24
3.4 <i>Namerané grafy</i>	25
3.5 <i>Výsledky merania</i>	33
4 ZÁVER	35
5 PREHĽAD LITERATURY	36

1 Úvod

Kondenzátory sú zariadenia slúžiace k ukladaniu elektrického náboja. Množstvo takto naakumulovaného náboja nazývame kapacita a meriame ju vo Faradoch (F). Superkondenzátory (niekedy tiež nazývané ultrakondenzátory) reprezentujú relatívne nový vývoj medzi zdrojmi elektrickej energie so schopnosťou opakovaného nabíjania a sú novým druhom kondenzátorov s extrémne vysokou kapacitou.

Hlavnou prednosťou superkondenzátorov je ich vysoká kapacita, ktorá dosahuje hodnôt stoviek až tisícov F, čo je asi miliónkrát vyššia hodnota než u kondenzátorov klasických. Preto sa tieto súčiastky využívajú stále viac. V súčasnej dobe sa používajú predovšetkým v automobilovom priemysle (štart spaľovacích motorov, rozjazd elektromobilov) alebo pri výrobe zdrojov obnoviteľnej energie (solárna energia). Ale tiež ako priemyslové aplikácie (záložné systémy energie) v spotrebiteľskom priemysle (bezdrátové ovládacie jednotky, hračky), či u telekomunikácii (mobilné telefóny, prenosné počítače).

2 Teoretická časť

2.1 Klasické kondenzátory

2.1.1 Princíp

Princíp kondenzátorov spočíva v jeho schopnosti hromadiť v sebe elektrický náboj. Kondenzátor sa skladá z dvoch dosiek (polepov) vzájomne izolovaných dielektrikom. Predstavme si trubku, ktorá má v sebe zatavenú pružnú membránu a je naplnená vodou. Membrána pri vyrovnanom tlaku z oboch strán prehradzuje trubku v celom priereze (na kondenzátore nie je napätie) a voda pochopiteľne nepreteká. Pokiaľ z jednej alebo z druhej strany zväčšíme tlak vody, membrána sa vychýli tým viac, čím väčší je tlak vody a na druhej strane vytlačí určité množstvo vody (na kondenzátor privedieme jednosmerné napätie). Keby tlak vody zväčšili nad hodnotu pevnosti membrány, dôjde k jej pretrhnutiu (pri zvýšení napätia nad povolené napätie dôjde k prerazu dielektrika a k skratu v kondenzátore). Pokiaľ sa bude tlak vody periodicky meniť, bude sa pohybovať i membrána a malé pohyby vodného stĺpca sa budú cez membránu prenášať aj na druhú stranu vodného stĺpca (ak zapojíme kondenzátor do obvodu striedavého prúdu, prúd ním preteká).

Napätie medzi doskami môže byť veľmi vysoké (rádovo niekoľko kV/cm). Hromadenie náboja polarizácie elektród sa deje bez akejkoľvek zmeny ich štruktúry, z toho plynie veľmi vysoká životnosť tohto systému.

Pretože perióda vybíjania resp. nabíjania kondenzátoru je veľmi malá (rádovo desatiny milisekúnd), veľmi vysoký je špičkový výkon. Pretože je možné pracovať s veľkým napätím medzi elektródami, akumulovaná energia je vplyvom malej kapacity malá.[5]

Nahromadený náboj $Q[C]$ je úmerný napätiu $U[V]$ medzi elektródami

$$Q = C \cdot U \Rightarrow C = Q/U \quad (1)$$

kde C je kapacita $[F]$

V prípade premennej kapacity je užívaný diferenciálny výraz

$$C = dQ/dU \quad (2)$$

Intenzita elektrického poľa $E [V/m]$ vytvoreného medzi elektródami

$$E = U/d \quad (3)$$

kde $d [m]$ je vzdialenosť medzi elektródami.

Pokiaľ uvažujeme, že veľkosť kapacity C je závislá na geometrických rozmeroch kondenzátoru a permitivite materiálu umiestneného medzi dvoma elektródami, dostaneme

$$C = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot (S/d) \quad (4)$$

kde $S [m^2]$ je plocha elektród, ε_r relatívna permitivita a ε_0 permitivita vakua.

Kapacita vodiča C je skalárna veličina, charakterizujúca schopnosť osamoteného vodiča zhromažďovať voľný elektrický náboj. Jej jednotkou je farad. Farad je kapacita elektrického kondenzátoru, ktorý pri napätí 1 voltu pojme náboj 1 coulombu.[5]

Nahromadená elektrostatická energia $W[J]$ je daná vzťahom

$$W = \frac{Q^2}{C} = \frac{1}{2} \cdot C \cdot U^2 \quad (5)$$

kde $C [F]$ je kapacita, $U [V]$ napätia a $Q [C]$ nahromadený náboj.

Výkon $P [W]$ je vyjadrený vzťahom

$$P = U \cdot I = R \cdot I^2 \quad (6)$$

kde $I [A]$ je elektrický prúd a $R [\Omega]$ odpor.

2.1.2 Vlastnosti kondenzátorov

Základné vlastnosti je možné charakterizovať týmito parametrami:

- veľkosť kapacity (jej hodnota a tolerancia)
- teplotná a napäťová závislosť kapacity
- izolačný odpor (zbytkový prúd) kondenzátoru
- strátový činiteľ kondenzátoru
- kmitočtová závislosť kapacity (impedancia kondenzátoru)
- maximálny provozný prúd a napätie kondenzátoru
- maximálny výkon a starnutie kondenzátoru (časová zmena parametrov)

2.1.3 Druhy kondenzátorov

Kondenzátorov je veľká rada druhov a delia sa - podľa použitého dielektrika (vzduchové, slúdové, keramické, papierové), podľa použitej technológie výroby (svitkové, elektrolytické), ďalej potom kondenzátory pevné, otočné, doladovacie atď.

Keramické kondenzátory

V súčasnosti majú prakticky najväčšie zastúpenie v elektronických prístrojoch všetkého druhu. Ich vlastnosti závisia predovšetkým na použitej keramike.

Sľudové kondenzátory

Sú z hľadiska vysokofrekvenčných vlastností vynikajúce, sú výborné i do rezonančných obvodov. Nevýhodou je veľkosť, dielektrická konštanta sľudy je malá. Preto sa vo väčšine aplikácii dnes nahradzujú špeciálnymi keramickými kondenzátormi.

Papierové kondenzátory

Málokto si uvedomí, že sa jedná o kondenzátory olejové, pretože papier je iba nosičom, napusteným vlastným dielektrikom – špeciálnym olejom. Obecne zlou vlastnosťou papierových kondenzátorov je vlhkosť, ktorá časom zhoršuje vlastnosti dielektrika.

Fóliové kondenzátory z plastických hmôt

Materiál pre dielektrikum je rôzny – polypropylén, polyester, styroflex . Majú obvykle teplotný koeficient a malé straty. Nevýhodou je malá odolnosť proti prierazu a proti vyšším teplotám pri letovaní.

Elektrolytické kondenzátory

Tie môžu byť „klasické“ – u ktorých je dielektrikum veľmi tenká vrstvička oxidu hliníku na kladnej elektróde, alebo tantalové, ktoré majú proti hliníkovým podstatne menší prechádzajúci prúd, menšiu parazitnú indukčnosť a stabilnú kapacitu, ale pri náhodnej zmene polarity u nich dochádza k trvalému prierazu. Tie vypadajú najčastejšie ako kvapky hustej farby . Používajú sa predovšetkým v napájacích obvodoch a všade tam, kde nie je na škodu ich vysoká parazitná indukčnosť.[5]

2.2 Superkondenzátory

Ukladanie energie pre potreby jej prenosu alebo zálohovania je s nárastom využitia elektroniky stále viac všeobecne diskutovaná téma. V súčasnej dobe existujú dve možnosti ukladania energie:

- **Akumulátory (sekundárne články)** - pracujú na chemickom princípe a sú vhodné pre "dlhodobé" uloženie el. energie a jej pomalé čerpanie. Vyžadujú pomalé nabíjanie.
- **Kondenzátory** - pracujú na elektrostatickom princípe uloženia náboja a sú vhodné pre krátkodobé uloženie energie a jej rýchle čerpanie. Vyznačujú sa rýchlym nabíjaním a vybíjaním

Ako alternatíva k obom typom sa ukazuje využitie tzv. **superkondenzátorov (supercapacitors)**, niekedy označované aj ako ultrakondenzátory (ultracapacitors) alebo EDLC (electric Double Layer Capacitor). U nich sa energia uchováva fyzikálne pomocou elektrickej dvojvrstvy alebo chemickou formou pomocou adsorbcie (interkalácie) iontov z elektrolytu do povrchovej vrstvy.

Kondenzátor ako elektronickú súčiastku je možné vyrobiť mnohými technológiami. Existujú kondenzátory pre vysokofrekvenčné aplikácie na báze keramiky, klasické svitkové alebo metalické kondenzátory s rôznym dielektrikom pre stredné frekvencie do rádu stoviek kHz. Pre nízkofrekvenčné a jednosmerné aplikácie je dôležitý elektrolytický alebo tantalový kondenzátor. Uvedené typy kondenzátorov sa bežne vyrábajú v rozsahu jednotiek pF až μF . Náboj, ktorý môžu zachytiť tieto kondenzátory je preto relatívne malý a pre dlhodobjšie skladovanie energie majú iba malý význam. Nový typ kondenzátoru, tzv. superkondenzátor dosahuje bežne kapacít v pásme jednotiek až tisícov Faradov, a tak sa už v tomto smeru trochu blížia akumulátorom. Zvýšenie mernej kapacity o mnoho rádov je dané ich princípom, ktorý je založený na využití vlastností elektrickej dvojvrstvy.[5]

2.2.1 Elektrická dvojvrstva

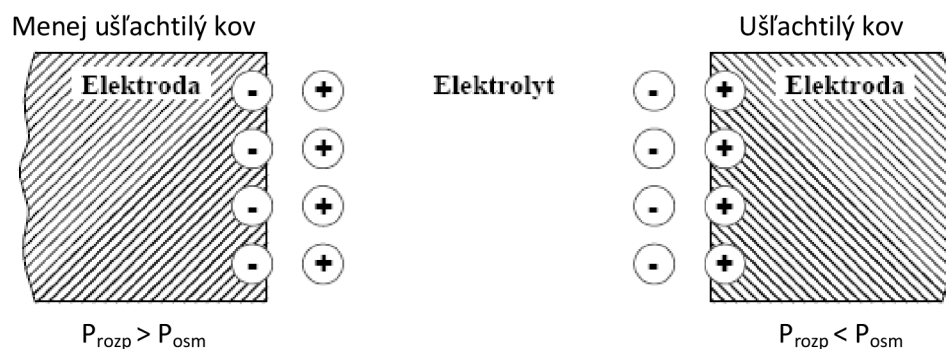
Elektrická dvojvrstva je výsledkom pôsobenia elektrolytického rozpúšťacieho tlaku P_{rozp} a osmotického tlaku P_{osm} na fázovom rozhraní elektróda – elektrolyt

1. Elektrolytický rozpúšťací tlak – sila, ktorou uvoľňuje katióny s kovom do roztoku. Čím je väčší rozpúšťací tlak tým je ľahšie katión uvoľňovaný.

2. Osmotický tlak - pôsobí proti rozpúšťaciemu tlaku. Osmotickým tlakom sa roztok snaží brániť proti vnikaniu katiónov z elektródy a usadiť ionty z roztoku na elektródu a zabudovať ich do kryštalickej mriežky elektródy

Ich výsledkom prebiehajú deje vplyvom rozdielu P_{rozp} a P_{osm} a dochádza k prechodu iontov na fázovom rozhraní elektróda – elektrolyt a vytvára sa elektrická dvojvrstva.

Oba tlaky pôsobia proti sebe, deje prebiehajú tak dlho dokiaľ elektrostatické sily pôsobiace medzi nábojmi v elektrickej dvojvrstve nie sú tak veľké, že dôjde k vyrovnaniu rozdielov medzi rozpúšťacím a osmotickým tlakom, čo bráni prechodu ďalších iontov, teda dôjde k rovnováhe [4]



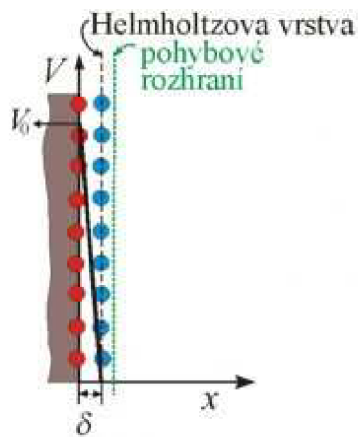
Katióny kovu prechádzajú z elektródy do elektrolytu.
Elektróny zostávajú, elektróda sa nabíja záporne.
Záporne nabitá elektróda k sebe priťahuje kladne nabité ionty elektrolytu, vznik dvojvrstvy

Katióny kovu z roztoku sa usadzujú na elektróde.
Nedostatok elektrónov, kladne nabitá elektróda.
Kladne nabitá elektróda k sebe priťahuje záporne nabité ionty elektrolytu, vznik dvojvrstvy

2.2.2 Modely elektrickej dvojvrstvy

Predstavy o štruktúre elektrickej dvojvrstvy, formulovanej na základe analýzy elektrostatických interakcií a tepelného pohybu iontov v elektrickej dvojvrstve. Každý z navrhnutých modelov sa približuje skutočnosti do určitej miery, ich vierohodnosť je posúdená podľa toho, ako ďaleko sú matematické vzťahy a kvalitatívne závery z modelovej predstavy vyplývajúcej v zhode s experimentálnymi faktami [2]

Helmholtzov model (obr. 1): Náboj vnútornej vrstvy (nabitého povrchu) je úplne kompenzovaný tesne priliehajúcou vrstvou protiiontov, plošná hustota náboja tejto vonkajšej vrstvy je rovnaká ako plošná hustota náboja nabitého povrchu (elektrická dvojvrstva je obdobou doskového kondenzátoru). Tento prvý model (1879) popisuje chovanie reálnych systémov pri vysokých koncentráciach elektrolytov (veľkej iontovej sile roztoku), kedy difúzna Gouyova-Chapmanova vrstva je stlačená a celý náboj vnútornej vrstvy je neutralizovaný nábojom plošnej vonkajšej vrstvy [2]



Obr.1 Helmholtzov model elektrickej dvojvrstvy

Gouy-Chapmanov model (obr. 2): Koncentrácia iontov vo vonkajšej vrstve plynule klesá so vzdialenosťou od nabitého povrchu. Stav tejto vrstvy je daný rovnováhou medzi elektrostatickými silami a tepelným pohybom iontov. Za predpokladu, že ionty sú elektricky nabité body bez vlastných rozmerov, vypracovali Gouy (1910) a Chapman (1913) matematickú teóriu, ktorá popisuje úbytok potenciálu a hustoty náboja v závislosti na vzdialenosti od povrchu. Pre zmenu potenciálu V so vzdialenosťou od povrchu x plynie z ich teórie vzťah

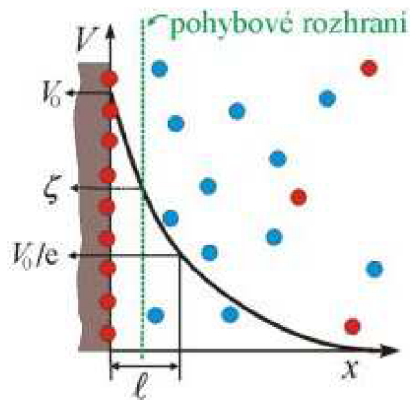
$$V = V_0 \cdot \exp(-x/l) \quad (7)$$

kde

$$l = \left(\frac{\epsilon_r \cdot \epsilon_0 \cdot k_B \cdot T}{e^2 \cdot \sum (z_i^2 \cdot v_{i0})} \right)^{1/2} = \frac{\text{konst}}{I^{1/2}} \quad (8)$$

je tzv. efektívna hrúbka dvojvrstvy (tj. vzdialenosť dosiek, akou by musel mať kondenzátor, aby mal rovnakú kapacitu, $C = \epsilon_r \cdot \epsilon_0 / l$, ako uvažovaná dvojvrstva), e - elementárny náboj, z_i - počet elementárnych nábojov, nesených iontom typu i , v_{i0} - koncentrácia (počet častíc v jednotke objemu) iontov i v objemovej fázi, l - iontová sila roztoku, k_B - Boltzmannova konštanta, ϵ_r - relatívna permitivita prostredia, ϵ_0 - permitivita vákua a V_0 - potenciál nabitého povrchu. [2]

V reálnych systémoch tvorí difúzna vrstva iba časť vonkajšej vrstvy elektrickej dvojvrstvy, ale jej význam stúpa pri veľkých zriedeniach elektrolytu.

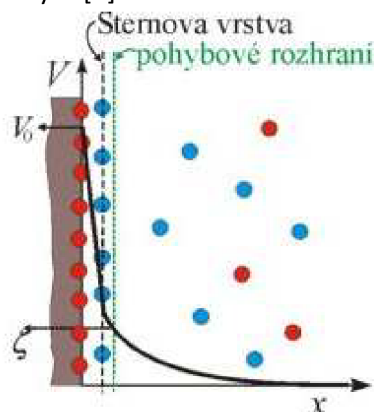


Obr.2 Gouy – Chapmanov model elektrickej dvojvrstvy

Sternov model (obr. 3): Vonkajšia vrstva elektrickej dvojvrstvy sa skladá z tesne priliehajúcej plošnej vrstvy (tzv. *Sternovej vrstvy*), ktorá je tvorená iontami viazanými k vnútornej vrstve prevažne adsorpčnými silami (ktoré majú proti silám elektrostatickým krátky dosah) o plošnej hustote náboja σ_1 , ktorá je z pravidla menšia než plošný náboj vnútornej vrstvy σ_0 , a z difúznej vrstvy, tvorenej iontami viazanými elektrostatickými silami (táto časť vonkajšej vrstvy býva označovaná ako Gouy-Chapmanova vrstva), ktoré neutralizujú zbytok náboja vnútornej vrstvy. Potenciál dvojvrstvy klesá najprv prudko na hodnotu potenciálu Sternovej vrstvy a potom pozvoľna k nule. Pre závislosť pomeru nábojov vo vonkajšej a vnútornej plošnej vrstve na iontovej sile roztoku I odvodil Stern za zjednodušených predpokladov vzťah (k je konštanta)

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_0} = \frac{\sqrt{1}}{k + \sqrt{1}} \quad (9)$$

Popis elektrickej dvojvrstvy týmto modelom najlepšie odpovedá experimentu, zvlášť pri stredných koncentráciach elektrolytu [2]



Obr.3 Sternov model elektrickej dvojvrstvy

2.2.3 Výhody a nevýhody superkondenzátorov

- Výhody - Dlhý životný cyklus, >100000 cyklov, niektoré systémy až 10^6
- Vysoká rýchlosť nabíjania
 - Dobrá hustota kapacity
 - Jednoduchý princíp a náročnosť výroby
 - Lacné materiály na výrobu
 - Nízka hmotnosť
 - Spojením s akumulátormi je možnosť použiť ako hybridné aplikácie

- Nevýhody - Nízke pracovné napätie
- Bezvodné systémy vyžadujú čisté, materiáli neobsahujúce vodu, drahé
 - Pre vyššie potenciály (el. Dopravné prostriedky) je nutné sériové radenie článku [5]

2.3 Elektródové materiály

Záujem uhlíku ako elektródový materiál pre superkondenzátory vzniká s jedinečných kombinácii chemických a fyzikálnych vlastností ako sú:

- vysoká vodivosť
- merný povrch ($>2000\text{m}^{-2}\text{g}^{-1}$)
- dobrá odolnosť voči korózii
- dobrá stálosť pri vysokých teplotách
- riadená štruktúra prieduchov
- spravovateľnosť a kompatibilita v kompozitných materiáloch
- relatívne nízka cena

Všeobecne povedané, prvé dve vlastnosti sú dôležité pri budovaní elektród pre superkondenzátory. Ako budeme vidieť, vlastnosti uhlíku vodivosť a merný povrch sa môžu upravovať a optimalizovať. Tieto aktivity sú predmetom množstva výskumov. Pred hodnotením výsledkov týchto výskumov, sa musí zvážiť viac detailov ohľadom uhlíku, napríklad jeho štruktúrna rozmanitosť a chemické správanie, aby sa lepšie porozumelo roli uhlíkových materiálov v superkondenzátoroch [1,7]

2.3.1 Štruktúra uhlíku

Uhlík má 4 kryštalické modifikácie:

- diamant(sp^3)
- grafit ,tuha(sp^2)
- karbyn(sp)
- fulleren(zdeformovaný sp^2)

Zatiaľ čo dve uhlíkové modifikácie sú prirodzene k nájdeniu v podobe minerálov, teda grafit a diamant, ďalšie formy uhlíku sú syntetické. Uhlík je považovaný za neobvyklý v počte jeho modifikácii a rozmanitosti štruktúrálnych foriem rovnako v jeho širokej škále fyzikálnych vlastností. Kvôli širokému počtu uhlíkových materiálov, termínu 'uhlík' je skôr popisovaný ako prvok než forma. Pre popisovanie materiálu na báze uhlíka sa spája ako 'sadze', 'aktívny uhlík', 'sklený uhlík' a iné [1,7]

2.3.2 Aktivácia uhlíku

Jednou s výborných vlastností použitia uhlíku ako materiál pre elektródy je, že môže byť okamžite prevedený do formy, ktorá má veľký merný povrch. Všeobecne povedané, proces k tomu, aby zvýšil merný povrch(a pórovitosť) napríklad žíhaním. Tento popis sa nazýva aktivácia a výslednou skupinou je materiál nazývaný aktívny uhlík.

Uhlíky obvykle majú relatívne malú pórovitosť a ich štruktúra sa skladá so základných kryštálov s veľkým množstvom dutín medzi nimi. Dutiny majú sklon byť vyplnené neusporiadanými uhlíkovými zbytkami (decht) ktoré bránia vstupy pórov. Aktivácia otvára tieto póry a tiež môže vytvárať dodatočné prieduchy. Meniaci sa uhlíkový predchodca a podmienky aktivácie (hlavne teplota, čas a plynné prostredie) povoľuje kontrolovať výslednú pórovitosť, veľkosť prieduchov, a povahu vnútorného rozloženia. Aj keď výrobcovia uhlíku prísne strážia svoje procedúry aktivácie komerčných uhlíkov, poznáme dva hlavné procesy aktivácie a to:

- tepelná aktivácia
- chemická aktivácia

Tepelná aktivácia, niekedy označovaná ako fyzikálna aktivácia, spôsobuje premenu dreveného uhlia riadeným splynovaním a je obvykle uskutočňovaná v rozsahu teplôt 700 až 1000°C v prítomnosti oksyločených plynov ako sú para, oxid uhličitý, vzduch, alebo zmes týchto plynov. Počas splynovania, oksyločená atmosféra výrazne zvyšuje množstvo pórov a merný povrch materiálu cez kontrolované spaľovanie uhlíku a eliminuje prchavé látky

tepelným rozkladom. Úroveň spaľovania závisí pravdepodobne najviac na teplote a dĺžke trvania aktivácie. Vysoký stupeň aktivácie je možné dosiahnuť nárastom spaľovania, ale dodatočná aktivita sa môže prejavíť na poklese pevnosti uhlíku, nižšej hustote a rozšírení pórov.

Chemická aktivácia je obvykle uskutočnená v mierne nižších teplotách približne 400 až 700°C a zahrňuje vysušanie istých chemických látok ako sú napríklad kyselina fosforová, chlorid zinočnatý a hydroxid draselný.

Po-aktivačný proces oplachovanie uhlíku je obvykle požadovaný k tomu, aby odstránil zbytkové reagujúce zložky rovnako dobre, ako každý anorganický zostatok (niekedy označovaný ako popol). Výnimočne vysoký merný povrch ($>2500\text{m}^2\text{g}^{-1}$) je pripravovaný na báze hydroxidu draselného [1,7]

2.3.3 Pórovitosť uhlíku

Pórovité uhlíky (hlavne aktivované formy) sa vyznačujú extrémne veľkým BET merným povrchom, v rozsahu od 500 do $3000\text{m}^2\text{g}^{-1}$. Tento merný povrch z veľkej časti vyplýva z prepojených reťazcov vnútorných pórov. Firma IUPAC (International Union of Pure and Applied Chemistry) klasifikuje póry do troch tried:

- Mikropóry (priemer menší než 2nm)
- Mezopóry (priemer medzi 2 až 50nm)
- Makropóry (priemery väčšie ako 50nm)

Mikropóry majú veľký merný povrch na objemový pomer a preto prítomnosť a vo výraznom podiele sú hlavnými prispievateľmi v meranej oblasti merného povrchu aktívneho uhlíku. Veľkosť mikropórov sa tiahnu k molekulovým rozmerom a hrajú dôležitú úlohu vo výbere adsorpčne založených procesoch cez obmedzený rozptyl a molekulárne sito. Kvalitné mikropóry tiež dokazujú, že sú výbornými adsorbent – adsorbátmi.

Mezopóry tiež prispievajú k mernému povrchu a ich relatívne väčšia veľkosť tiež dovoľuje zlepšenú schopnosť adsorbentu poskytovať širší prenos pórov pre difúziu.

Makropóry obecné poskytnú zanedbateľný prínos pre merný povrch uhlíku. Ich hlavnou funkciou je prenos vo vnútri uhlíkových častíc [1,7]

2.3.4 Formy uhlíku

Uhlíkové sadze sú skupinou materiálov, ktoré sa vyznačujú guľovitými časticami koloidných veľkostí, ktoré sú produkované čiastočným spaľovaním alebo tepelným rozkladom (obvykle plyny, oleje) v plynnej fáze. Ich základné vlastnosti sa môžu líšiť použitými surovinami a výrobnými podmienkami. Ich kľúčovými vlastnosťami sú drobnosť (primárna veľkosť častíc), štruktúra (nahromadená veľkosť/tvar), pórovitosť, chemické zloženie povrchu.

Uhlíkové sadze sú stále používané ako vodivá výplň v rôznych druhoch batérii a superkondenzátoroch. Vysoko vodivé uhlíkové sadze sa vyznačujú vysokou kvalitou, veľkou pórovitosťou, malou veľkosťou častíc a chemicky čistým povrchom. Vodivosť sa pohybuje v rozsahu 10^{-1} do $10^{-2} (\Omega \cdot \text{cm})^{-1}$. Množstvo uhlíkovej sadze má dôležitý význam, pretože v malom množstve nemusí ovplyvniť vodivosť. Veľká pórovitosť jemných sadzí má viac častíc na jednotku hmotnosti a preto sa redukuje šírka pásma medzi plnivom kvôli ich veľkému číslu. Elektródy superkondenzátorov sú vytvárané sadzami (obsahujúcimi pojivo) so špecifickou kapacitou až do 250 F na gram. [1,6,7]

Uhlíkové Aerogély sú vysoko pórovité materiály pripravené pyrolýzou z organických aerogélov. Obyčajne sú tvorené resorcin formaldehydovými pryskyřicami. Pevný základ aerogélov je zložený prepojenými koloidnými časticami alebo polymérnymi reťazcami. Po pyrolýze, výsledný uhlíkový aerogél je viac elektricky vodivý ako väčšina aktívneho uhlíku. Uhlíkové aerogély získané pyrolýzou resorcin formaldehydových pryskyříc, sú preferované kvôli ich vysokej pórovitosti, vysokému mernému povrchu ($400-1000 \text{m}^2 \text{g}^{-1}$), jednotnej veľkosti pórov (medzi 2 až 50nm) a vysokej hustote. Môžu byť tiež produkované ako monolyty, zmesi, tenké fólie alebo prášky. [1,6,7]

Uhlíkové vlákna sú obvykle vytvárané tepelným vytvrdzovaním organických materiálov ako je napríklad celulóza (umelý hodváb), fenolová pryskyřice, polyacrylonitrile (PAN). Príprava uhlíkových vlákien pozostáva z prípravy roztoku alebo taveniny, pretlačovaním tohto materiálu cez lis alebo zvlákňovacie trysky, a vyhotovovanie pretlačeného materiálu do tenkého vlákna. Po stabilizácii (200-400°C) a zuhoľnatení (800-1500°C) vlákno môže byť aktivované v kontrolovanom oksyločenom prostredí pri teplote (400-900°C) alebo môže byť premenené v grafit (ak sa teplota navýši na 3000°C).

Kvalita uhlíkového vlákna závisí na štruktúre a nazhromaždení aromatických zložiek a ich polohe. Tieto faktory sú postupne ovplyvňované výrobnými procesmi. Uhlíkové vlákna sú dostupné v mnohých formách, napríklad látky, nite, naštepené vlákna, káble. Aktívne

uhlíkové vlákna s merným povrchom až do $2500\text{m}^2\text{g}^{-1}$ sú komerčne prístupné. Elektródy pripravované pomocou práškoveho uhlíku aktívneho vlákna majú veľký merný povrch, dobrú elektrickú vodivosť, nízky elektrický odpor. [1,6,7]

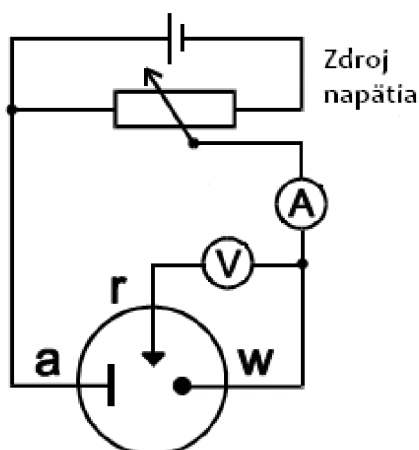
Sklený uhlík (alebo tiež označovaný ako sklovitý alebo polymerický uhlík). Vyrába sa pyrolýzou termosetových polymérov, ktoré majú vytvorenú trojrozmernú štruktúrnu sieť. Fyzikálne vlastnosti sklenených uhlíkov sú obecné závislé na maximálnej teplote spracovania, ktoré sa môžu meniť ($600\text{-}3000^\circ\text{C}$). Zdá sa že teploty okolo hodnoty 1800°C produkujú sklené uhlíky s vhodnými vlastnosťami. Sklené uhlíky majú málo prístupný merný povrch a relatívne malú hustotu ($1,5\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) a majú nízky elektrický odpor. [1,6,7]

Uhlíkové nanoštruktúry (nanotrubic a nanovlákn) sú vytvárané katalytickým rozkladom určitých uhľovodíkov. Opatrnou manipuláciou rôznych parametrov, je možné vytvárať nanoštruktúry s rozmanitými tvarmi a tiež kontrolovať ich kryštalickú vrstvu. Jednoznačný záujem o použitie uhlíkových nanotrubíc ako elektródový materiál pre superkapacitor a iný spôsob ukladania energie. Široká škála nanotrubíc ponúka unikátnu kombináciu nízkeho elektrického odporu a veľkej pórovitosti. Kapacita uhlíkových nanotrubíc závisí hlavne na ich zložení a čistote. Pre čisté nanotrubic (napríklad bez katalytických zvyškov alebo amorfneho uhlíku) kapacita dosahuje $15\text{-}20\text{ F}$ na gram s merným povrchom ($120\text{-}400\text{m}^2\text{g}^{-1}$). [1,6,7]

2.4 Cyklická voltametria

Voltametria: Elektrochemické články používané vo voltametrii sú zostavované z polarizovateľnej pracovnej elektródy ponorenej do analyzovaného roztoku a nepolarizovateľnej referenčnej elektródy spojenej s analyzovaným roztokom soľným mostíkom. Pri voltametrickej analýze sa sleduje závislosť elektrického prúdu tečúceho týmto článkom na potenciáli pracovnej elektródy, ktorý sa s časom mení (napr. lineárne s časom rastie alebo klesá); potenciál pracovnej elektródy sa riadi z externého zdroja. V prípade, že v roztoku nie je látka, ktorá by sa redukovala alebo oxidovala, je pracovná elektróda spolarizovaná a prúd ňou netečie. Ak je v roztoku látka, ktorá sa pri určitom potenciáli oxiduje alebo redukuje, dôjde k depolarizácii elektródy a tečie ňou prúd. Veľkosť odpovedajúceho anodického či katodického prúdu je mierou koncentrácie tohto depolarizátoru – analytu. Látky spôsobujúce depolarizáciu elektródy sa obecné nazývajú depolarizátory, v elektro - analytických metódach sú sledovanými depolarizátormi hlavne stanovené látky, analyt.

Inštrumentácia: Princiálne zapojenie obvodu na vytváranie voltametrických meraní je na obr.4. Napätie zo zdroja vkladané na pracovnú a referenčnú elektródu je merané voltmetrom a prúd tečúci článkom je meraný ampérmetrom. Voltametrický článok je doplnený o tretiu pomocnú elektródu. Prúd tečie medzi pomocnou a pracovnou elektródou a skutočný potenciál pracovnej elektródy sa meria medzi pracovnou a referenčnou elektródou za bez prúdového stavu. Elektrochemické reakcie, ktoré prebiehajú pri prechode prúdu na pomocnej elektróde sa nesledujú, býva to oxidácia vody, či redukcia vodíkového iontu. Zdrojom napätia v trojelektrodovom zapojení je elektronický potenciostat. Potenciostat je prístroj, ktorý udržuje potenciál pracovnej elektródy na požadovanej hodnote tým, že sa požadovaný potenciál neustále porovnáva s aktuálnym zmeraným potenciálom a prípadný rozdiel, spôsobený napr. úbytkom napätia na odpore roztoku, automaticky vyrovnáva zmenou napätia na pomocnej elektróde. [8]



Obr.4: Schéma zapojenia obvodu pre voltametrické meranie v trojelektrodovom usporiadaní elektrochemického článku

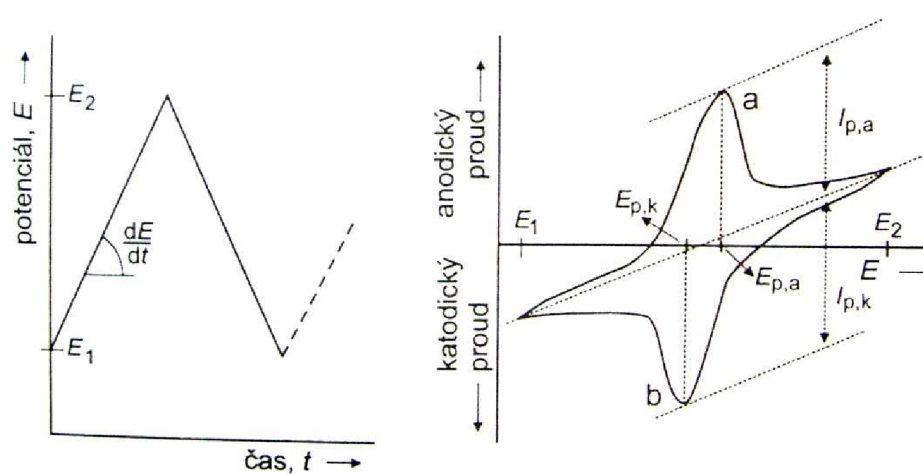
Cyklická voltametria je metóda, pri ktorej sa na stacionárnu elektródu v nemiešanom roztoku vkladá potenciál trojuholníkového priebehu s rýchlosťou zmeny (rýchlosti polarizácie) dE/dt (obr.5). Polarizačné krivky majú tvar špičky a prúd špičky závisí na rýchlosti časovej zmeny potenciálu. V dôsledku toho, že difúzia je relatívne pomalý transportný proces, pri dostatočne vysokej rýchlosti polarizácie nestačia produkty elektródovej reakcie úplne oddifundovať od elektródy a za vhodných podmienok je možné pri opačnom smere potenciálovej zmeny detegovať.

Priame analytické využitie metódy je malé, hlavný význam má pri štúdiu elektródových reakcií. Z priebehu katodických a anodických kriviek je možné usudzovať na mechanizmus elektródové reakcie, napr. posudzovať ich reverzibilitu. Pre reverzibilné reakcie platí:

- Rozdiel potenciálov anodickej a katodickej špičky $E_{p,a} - E_{p,k}$

- Podiel prúdov anodickej a katodickej špičky $I_{p,a}/I_{p,k}$
- Potenciál špičky je nezávislý na rýchlosti zmeny potenciálu dE/dt

Pre ireverzibilný dej závisí rozdiel potenciálu anodickej a katodickej špičky na rýchlosti polarizácie, dE/dt , a hodnotách α a k^0 charakterizujúce ireverzibilný dej, pričom s tejto závislosti je možné tieto parametre určiť. Priama úmera medzi špičkou a odmocninou z polarizácie $(dE/dt)^{1/2}$, platí iba u dejov riadených difúziou. U dejov kontrolovaných adsorpciou (pri ktorej je elektrochemická látka adsorbovaná na povrchu pracovnej elektródy) je výška špičky priamo úmerná rýchlosti polarizácie dE/dt . [8]



Obr.5: Potenciálový program a prúdová odozva pri cyklickej voltametrii. V príklade je na cyklickom voltamograme vidieť, ako sú produkty vzniknuté oxidáciou (špička a) a pri opačnom smere potenciálovej zmeny redukované (špička b).

3 Praktická časť

3.1 Skúmanie uhlíkových materiálov

V tejto časti som pripravoval elektródy obsahujúce rôzne typy uhlíkových materiálov. Sledoval som ako určitý materiál ovplyvnil výslednú kapacitu superkondenzátoru. Ako uhlíkové materiály som použil:

- **Vulcan GP3893**
- **Cabot Black Pearls 2000**
- **Nanotrubice 632B**
- **Nanotrubice 632C**
- **Nanotrubice 1** (Vonkajší priemer (OD) – 3-10nm, Vnútorý priemer(ID) – 1-3nm, dĺžka - 0,1 – 10 μ m, 90+%)
- **Nanotrubice 2** (Vonkajší priemer (OD) – 60-100nm, Vnútorý priemer(ID) – 5-10nm, dĺžka – 0,5 – 500 μ m, 95+%)
- **Nanotrubice 3** (Vonkajší priemer (OD) – 40-70nm, Vnútorý priemer(ID) – 5-40nm, dĺžka – 0,5 – 2 μ m, 95+%)
- **Nanotrubice 4** (Vonkajší priemer (OD) – 110-170nm, dĺžka - 5 – 9 μ m, 90+%)
- **Nanosorb**
- **Expandovaný grafit**

3.1.1 Príprava elektródy a pasty

Navážil som si potrebné množstvo uhlíkového materiálu do ktorého som pridal destilovanú vodu a nechal poriadne prevariť približne hodinu za stáleho miešania. Pre lepšiu zmáčivosť som pridal trochu isopropylalkoholu. A nakoniec som v požadovanom pomere pridal injekčnou striekačkou pojivo PTFE 60%(Polytetrafluóretylén) a nechal ešte 10 minút premiešať. Takto pripravený materiál som nechal aspoň 24 hodín odstáť. Prefiltroval som ho cez filtračný papier a nechal vysušiť v peci aby sme materiál nechali kompletne zbaviť vody.

Odstrihol som si vodivú mriežku o veľkosti približne 1x2cm, ktorú som následne zvážil na digitálnej váhe s presnosťou na tisícinu gramu. Pripravenú pastu som naniesol na mriežku, nechal znova vysušiť a znova odvážiť, tento krát aj s nanosenou pastou. Takto pripravená elektróda bola pripravená na meranie.

3.1.2 Príprava merania

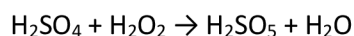
Pre meranie som použil spojené sklenené nádoby, ktoré boli na koncoch utesnené gumenými uzávermi. Nádoby boli naplnené elektrolytom, konkrétne 0,5 molárny roztok chloristanu lithného a propylenkarbonátu. Na gumené uzávery boli pripevnené krokosvorky, ktoré držali meranú elektródu a lithium. Z toho vyplýva že meranie som robil tak, že meraná elektróda bola meraná proti lithiu.

3.2 Skúmanie aktivačných činiteľov

V tejto časti som vyššie uvedené materiály som upravoval pomocou rôznych aktivačných činiteľov. Buď to bolo žíhaním materiálu alebo chemickou aktiváciou

3.2.2 Príprava materiálu GP3893 Vulcan s Caroovou kyselinou

Vodný roztok kyseliny peroxosírovej (Caroova kyselina) sme pripravili v laboratóriu zmiešaním kyseliny sírovej s peroxidom vodíku v našom prípade v pomere (7:3)



Uhlíkový materiál GP3893 Vulcan sme rozptýlili s Caroovou kyselinou v sklenenej nádobe, v ktorej sme materiál premiešavali 5hodín. Následne sme materiál prefiltrovali destilovanou vodou pokým sme nedosiahli neutrálne PH a nechali presušiť v peci aby sme sa kompletne zbavili vody. Tento materiál sme testovali bez pridania teflónu a s pridaným teflónom. Výsledky sú zhodnotené v závere.[3]

3.2.3 Príprava materiálu GP3893 Vulcan s chlorovodíkovou kyselinou

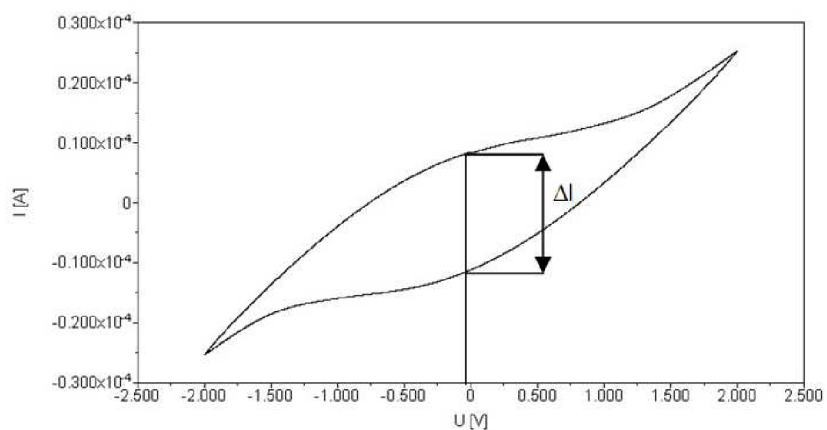
V tomto spracovaní sme pripravovali GP3893 Vulcan s kyselinou chlorovodíkovou, ktorá je známa tým že ten materiál očistí od nečistôt. Materiál sme nechali premiešavať 2 hodiny. Následne sme materiál prefiltrovali destilovanou vodou, pokým sme nedosiahli neutrálneho PH a nechali presušiť v peci. Materiál sme testovali bez prídavného varenia a s prídavným varením. Všetky výsledky sú zhodnotené v závere.[3]

3.3 Výpočet Kapacity

Všetky merania boli merané na prístroji AUTOLAB PGSTAT12. Pomocou programu GPES som urobil všetky merania. Metódou cyklickej voltametrie sme učili odoberaný a dodávaný prúd daného priebehu a následne sme vypočítali kapacitu pomocou vzťahu (10)

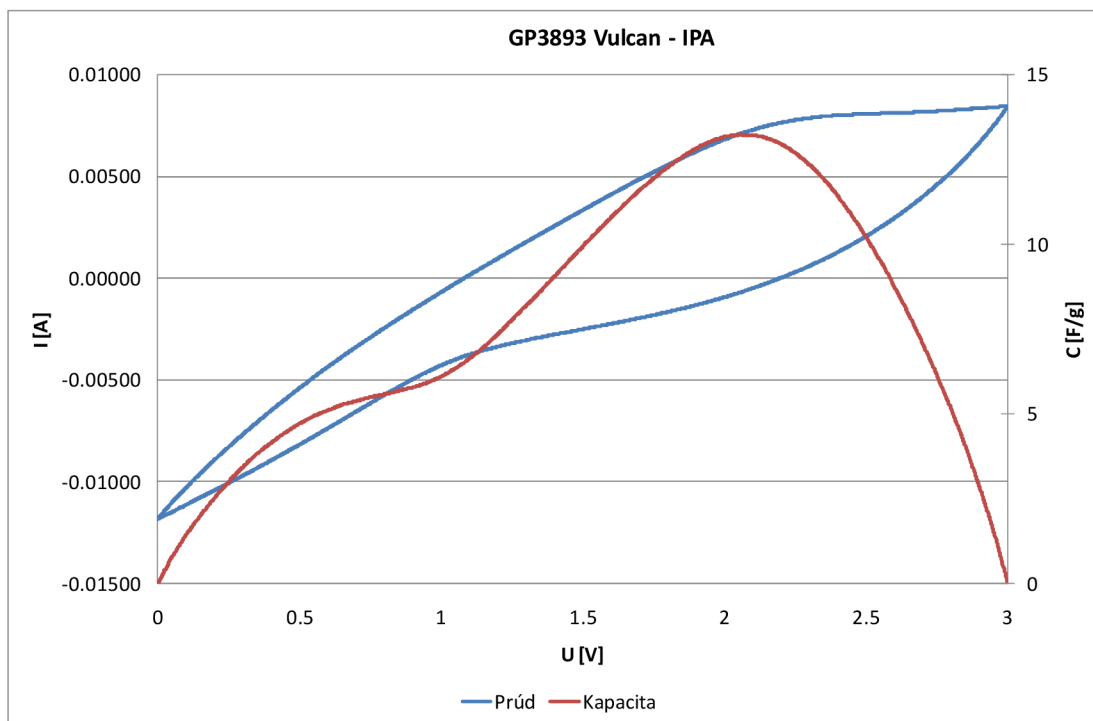
$$C = \frac{1}{2} \frac{\Delta I}{v} \quad (10)$$

Kde C [F] je kapacita, ΔI [A] je rozdiel nabíjaného a vybíjaného prúdu viz. obr.6 a v [V/s] je strmosť (rýchlosť zmeny napätia)

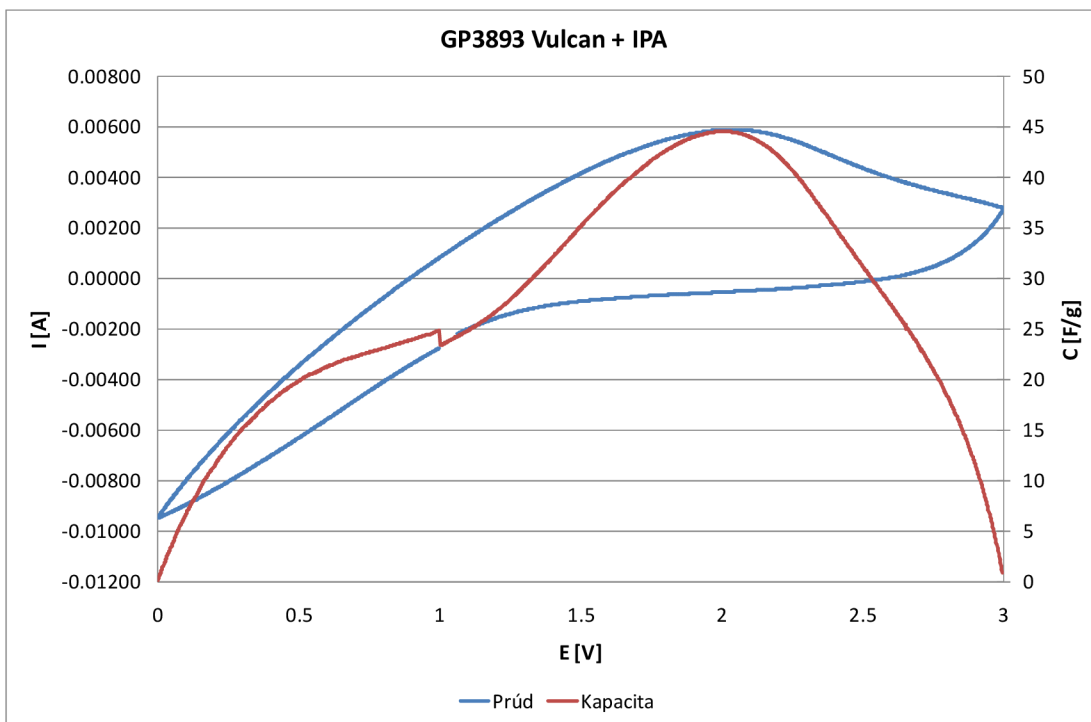


Obr.6: Určenie ΔI pri cyklickej voltametrii

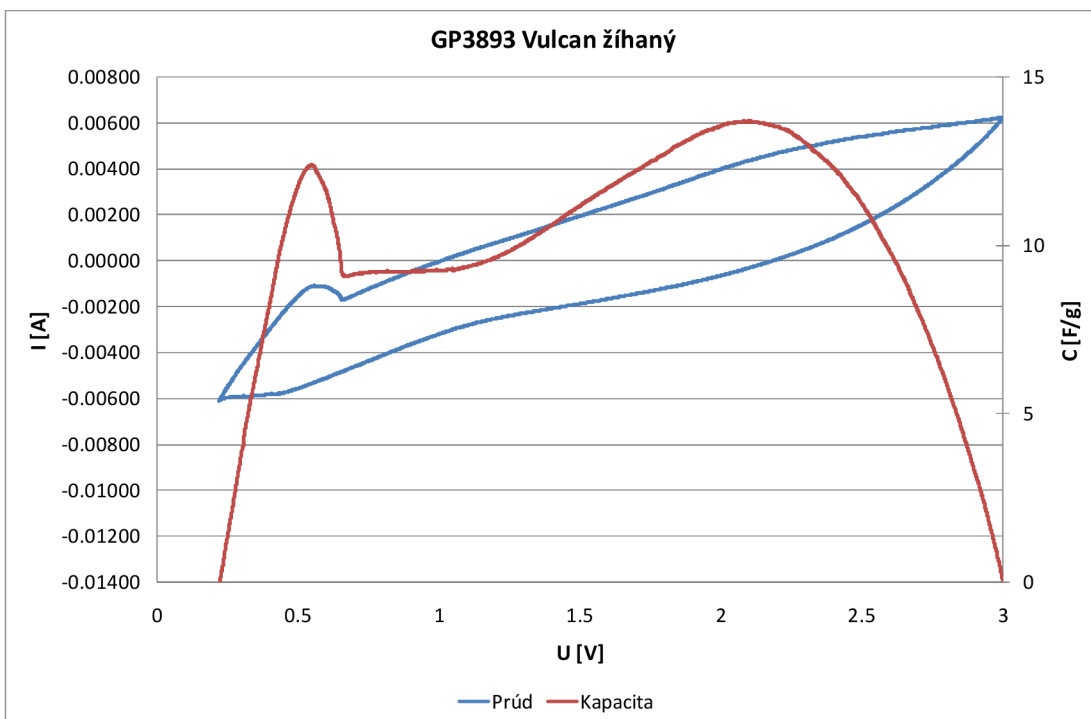
3.4 Namerané grafy



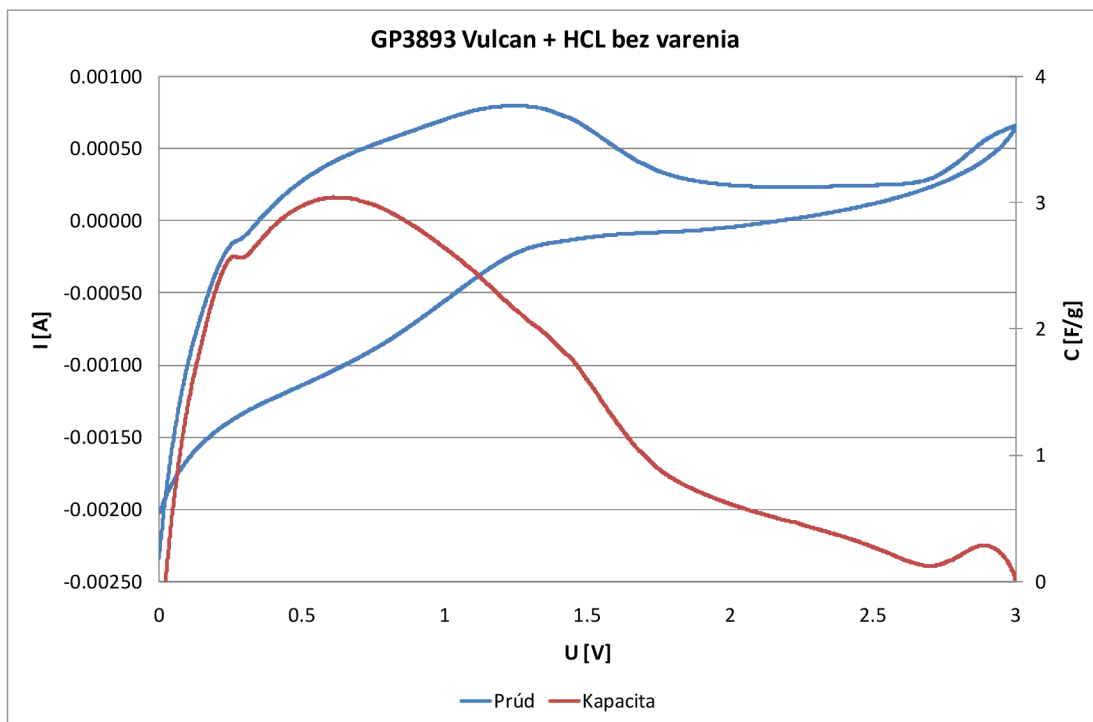
Obr.7 Cyklická voltametria GP3893 Vulcan bez použitia izopropylalkoholu



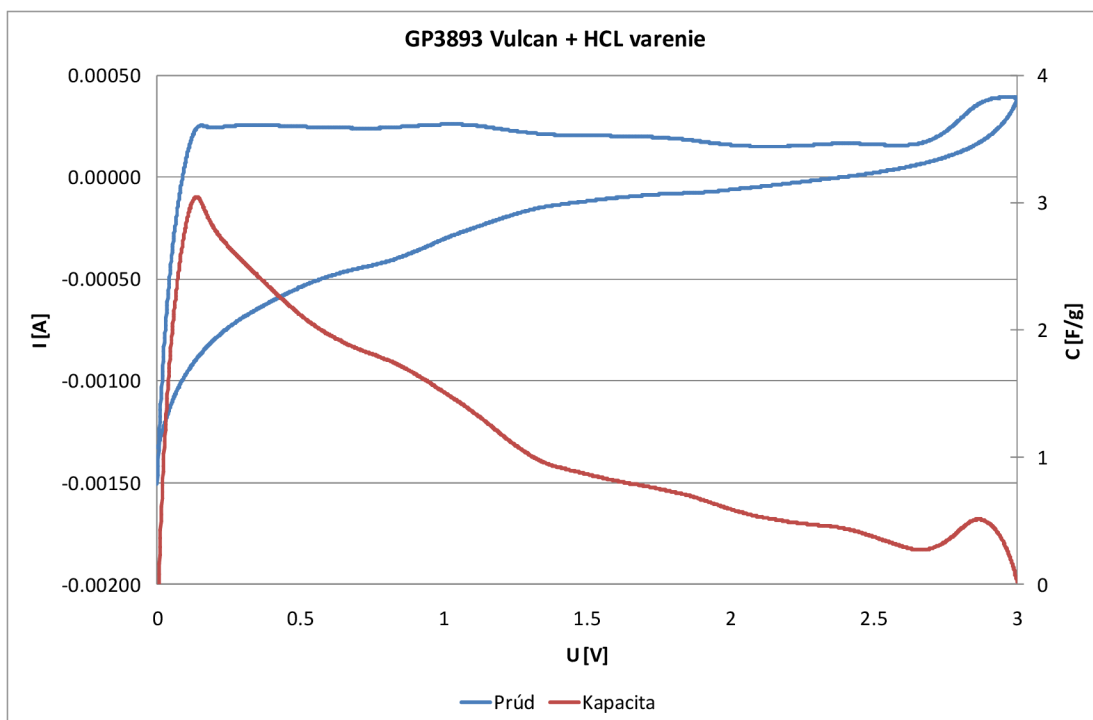
Obr.8 Cyklická voltametria GP3893 Vulcan s použitím izopropylalkoholu



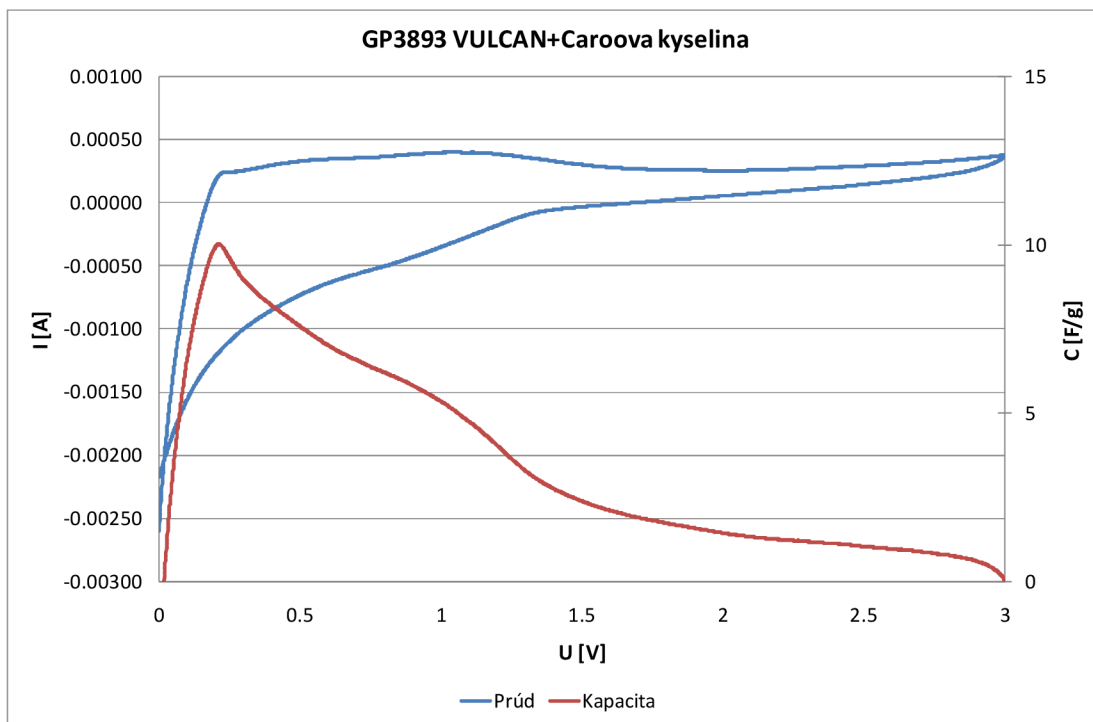
Obr.9 Cyklická voltametria GP3893 Vulcan žíhaný



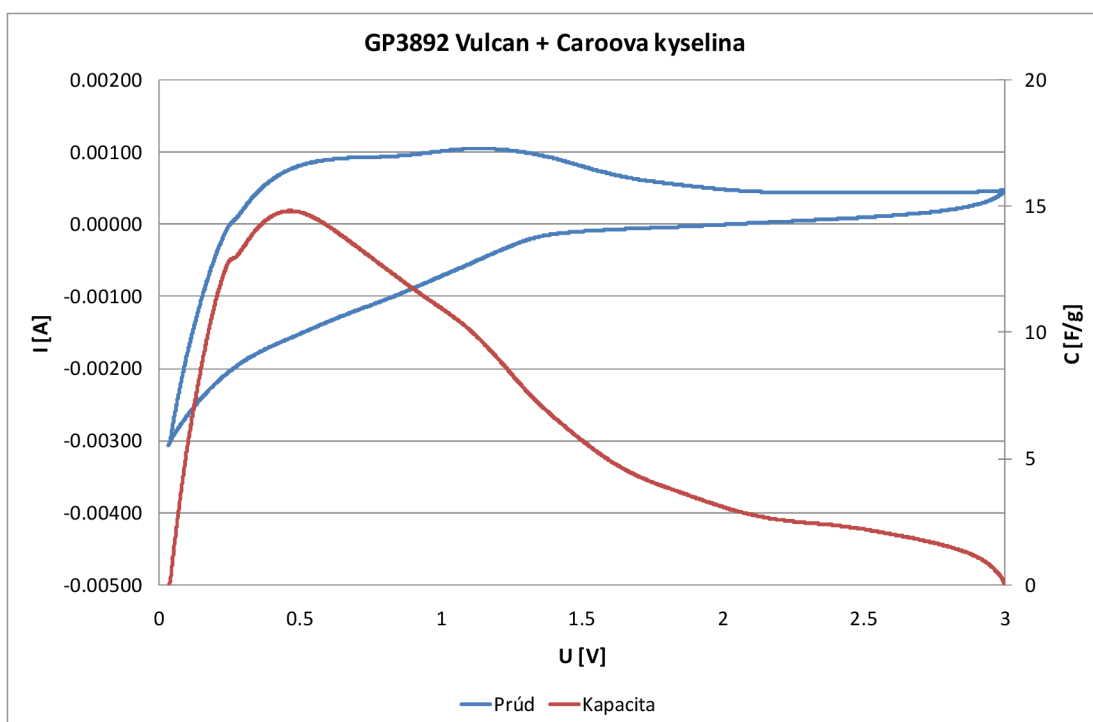
Obr.10 Cyklická voltametria GP3893 Vulcan+HCL bez ďalšieho varenia



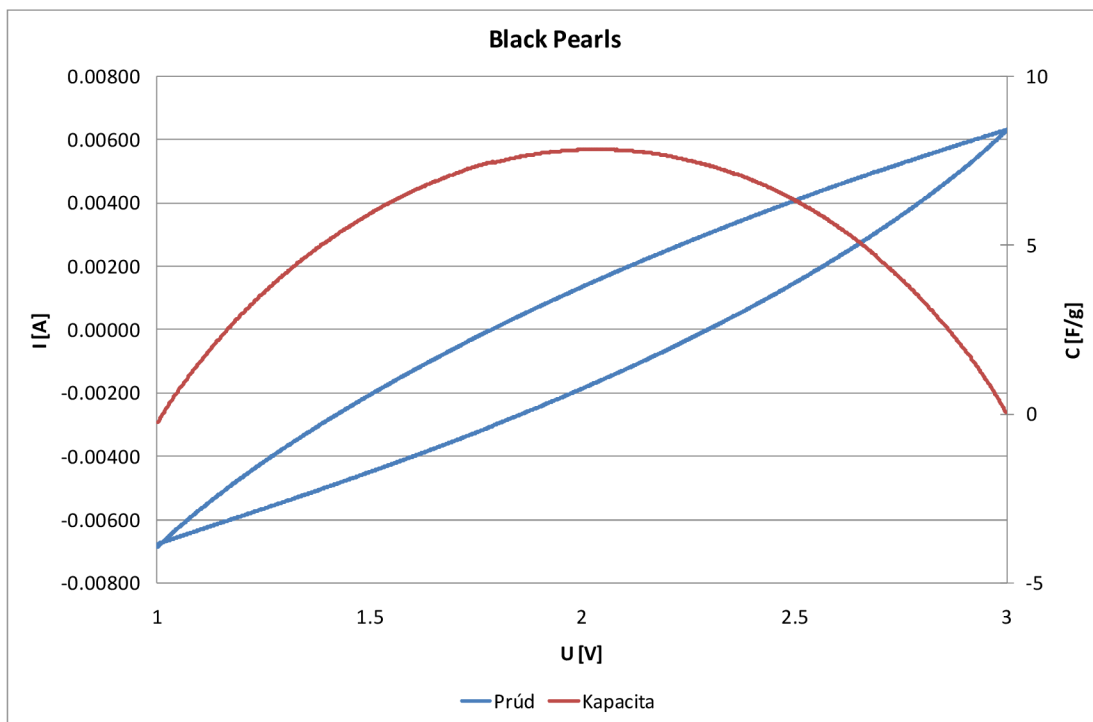
Obr.11 Cyklická voltametria GP3893 Vulcan+HCL s ďalším varením



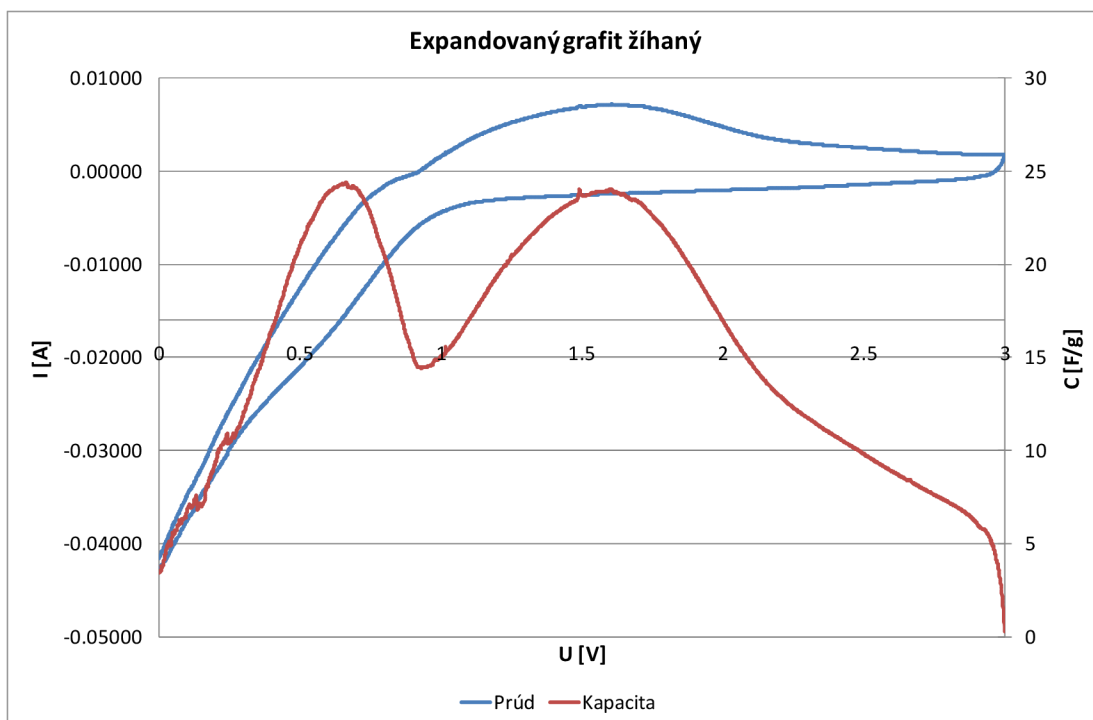
Obr.12 Cyklická voltametria GP3893 Vulcan+Caroova kyselina



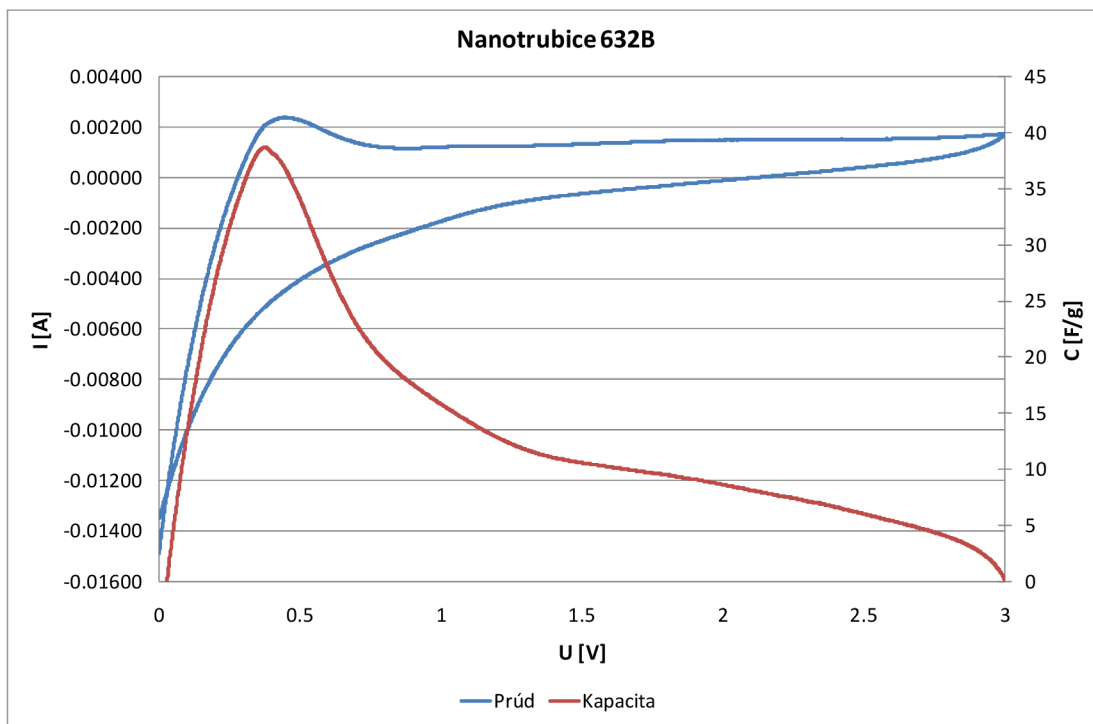
Obr.13 Cyklická voltametria GP3893 Vulcan+Caroova kyselina bez použitia teflónu



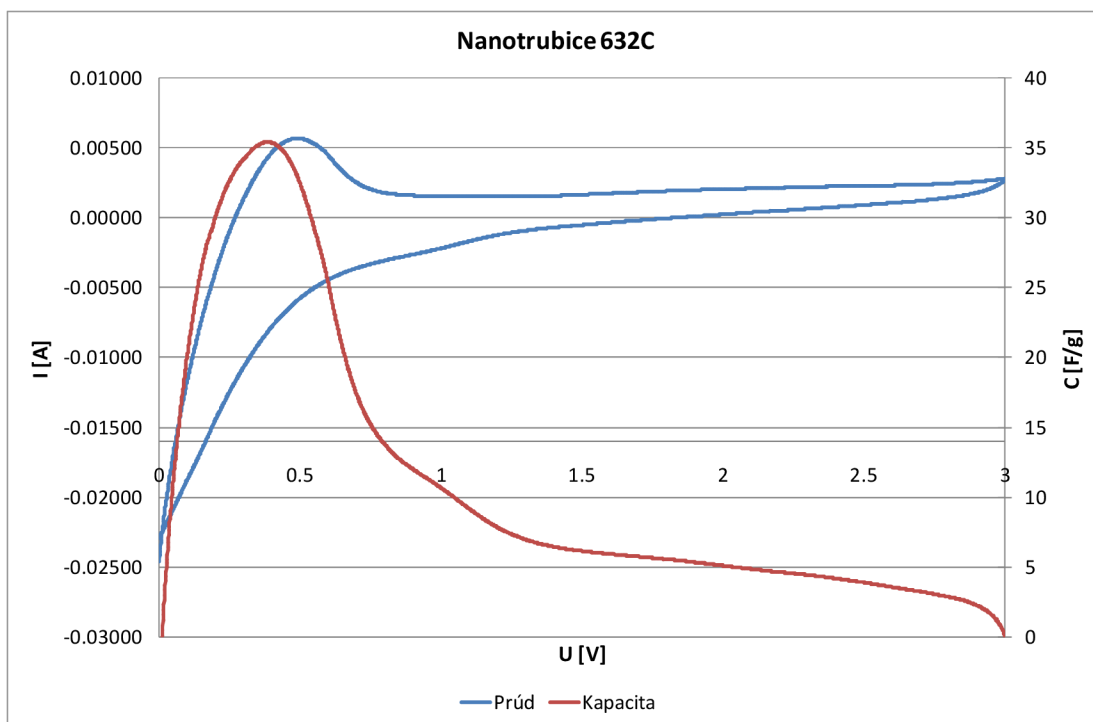
Obr.14 Cyklická voltametria Cabot Black Pearls 2000



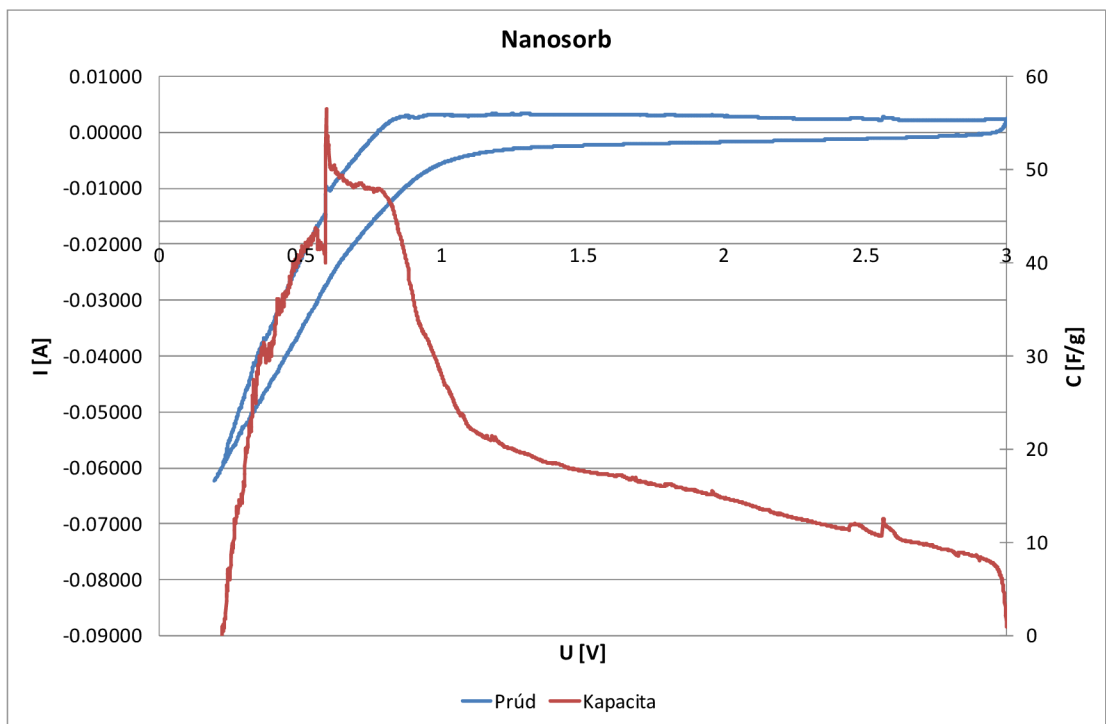
Obr.15 Cyklická voltametria Expandovaného žíhaného grafitu



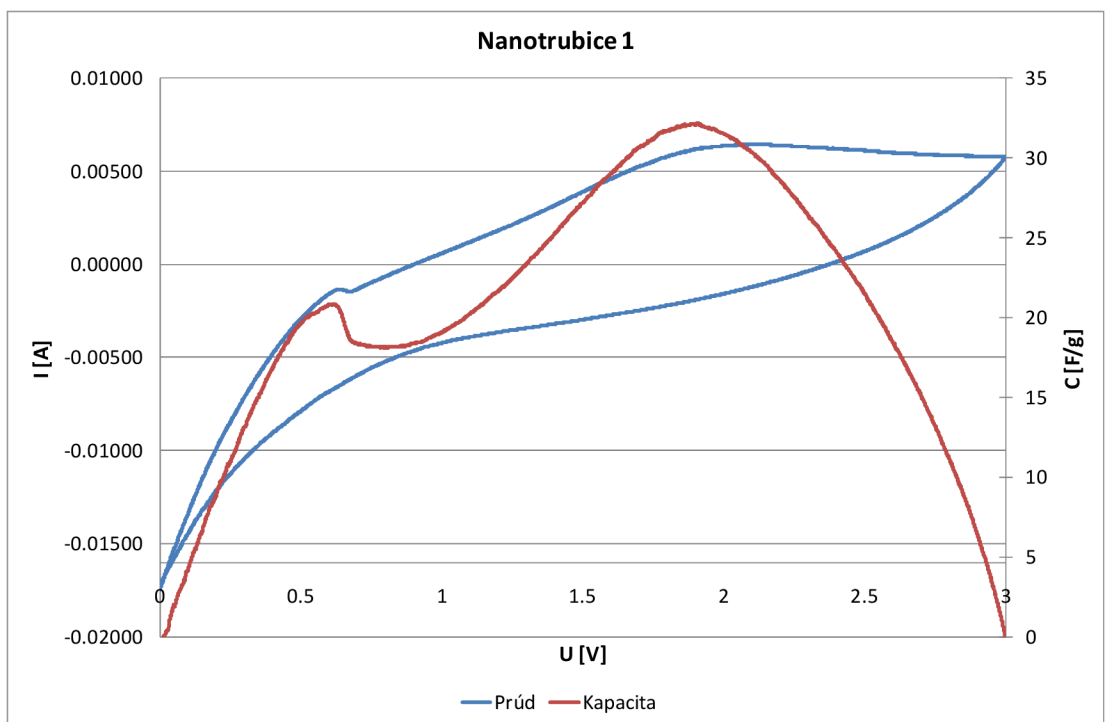
Obr.16 Cyklická voltametria Nanotrubice 632B



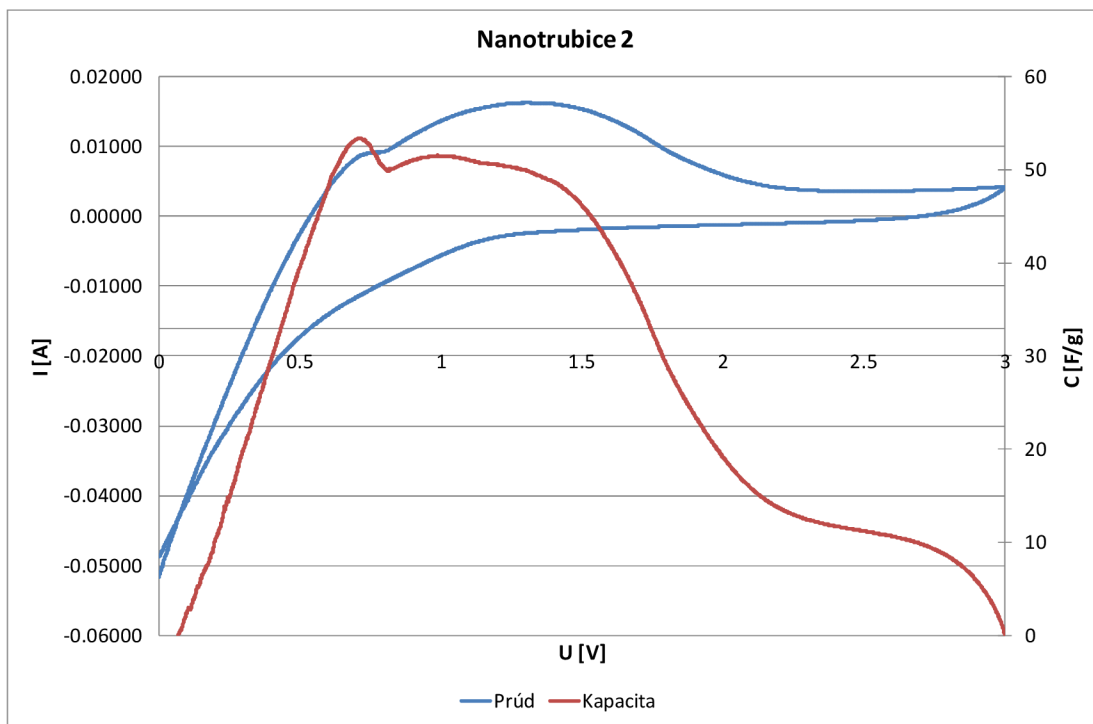
Obr.17 Cyklická voltametria Nanotrubice 632C



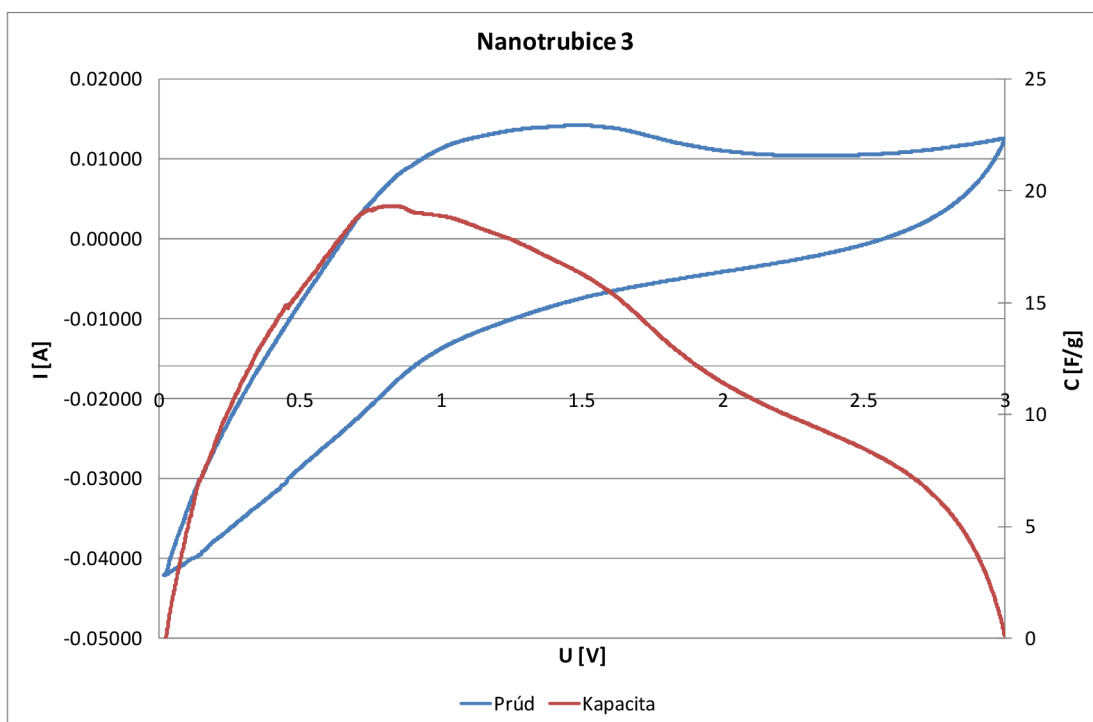
Obr.18 Cyklická voltametria Nanosorbu



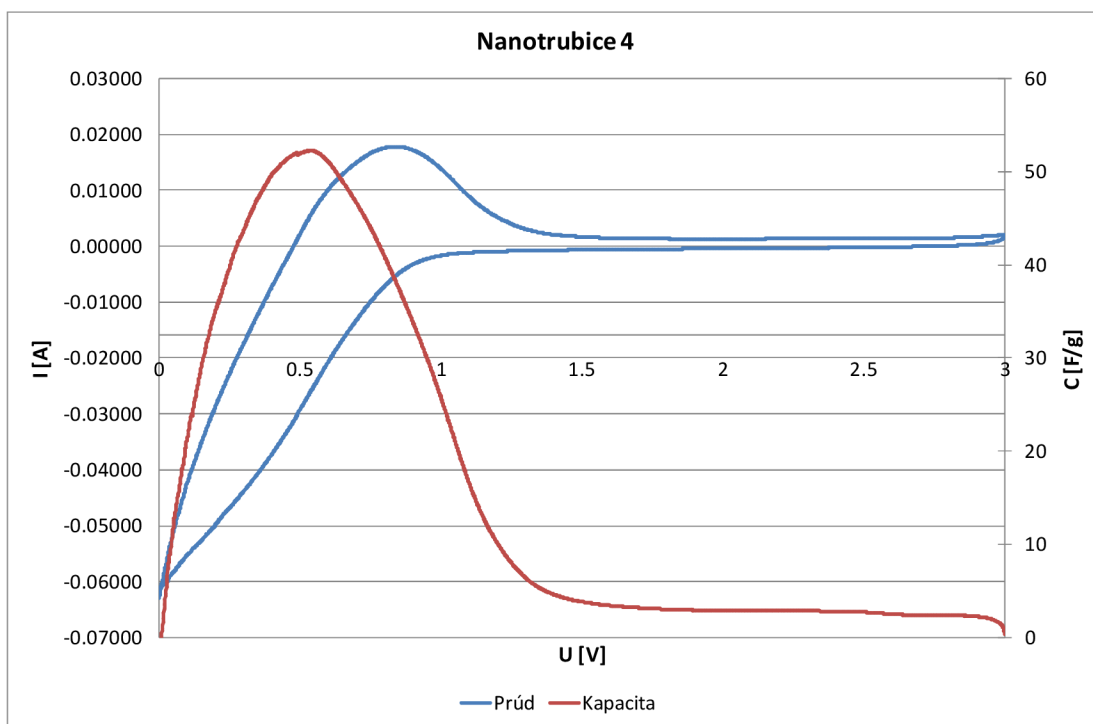
Obr.19 Cyklická voltametria Nanotrubičice 1



Obr.20 Cyklická voltametria Nanotrubice 2



Obr.21 Cyklická voltametria Nanotrubice 3

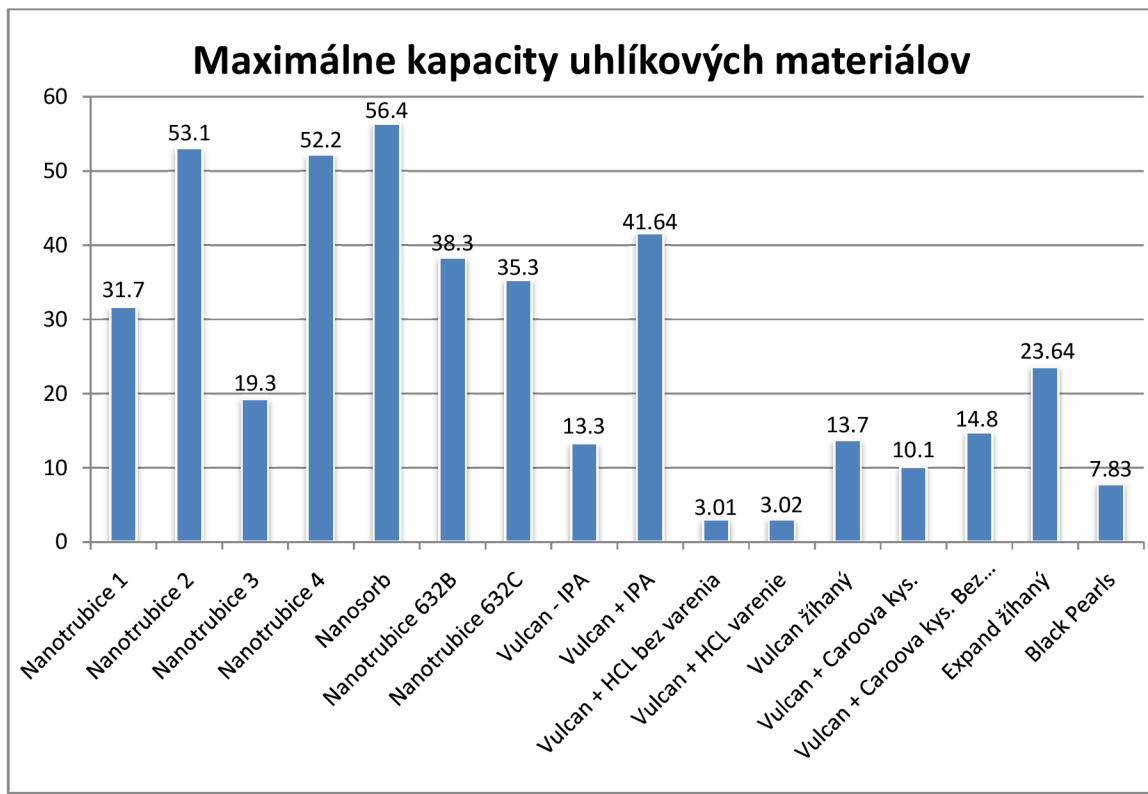


Obr.22 Cyklická voltametria Nanotrubice 4

3.5 Výsledky merania

Materiál	Kapacita(F/g)
Nanotrubice 1	31.7
Nanotrubice 2	53.1
Nanotrubice 3	19.3
Nanotrubice 4	52.2
Nanosorb	56.4
Nanotrubice 632B	38.3
Nanotrubice 632C	35.3
Vulcan - IPA	13.3
Vulcan + IPA	41.64
Vulcan + HCL bez varenia	3.01
Vulcan + HCL varenie	3.02
Vulcan žíhaný	13.7
Vulcan + Caroova kys.	10.1
Vulcan + Caroova kys. Bez teflónu	14.8
Expand žíhaný	23.64
Black Pearls	7.83

Tab.1 Najvyšie dosiahnuté kapacity u meraných materiálov



Obr.23 Graf s výslednými kapacitami všetkých použitých materiálov

4 Záver

Cieľom mojej bakalárskej práce bolo preštudovať superkondenzátory, prakticky vyhodnotiť uhlíkové materiály použitých pri príprave elektród superkondenzátorov a zvoliť najvhodnejšiu technológiu úprav aktivácie uhlíku.

Najvyšších kapacít som dosiahol pri nanoštrukturovaných materiáloch a to konkrétne u nanosorbu, nanotrubic. Najmenších kapacít bolo dosiahnuté u materiáloch upravovaných chemickou aktiváciou.

Zvoliť vhodnú technológiu úpravy uhlíku nie je jednoduché najmä keď pri daných úpravách bol testovaný iba jeden druh materiálu. Pri viacerých materiáloch by boli výsledky presnejšie. Usúdil som, že aktivácia uhlíku pomocou kyselín nie je výhodné. O trochu lepšie je na tom úprava pomocou žíhaní, kde výsledky boli už priaznivejšie. Ale najlepších výsledkov som dosiahol u materiálov bez špeciálnych úprav, len bežnými prípravami.

Prvým testovaným materiálom bol GP3893 Vulcan, kde som testoval aký vplyv bude mať isopropylalkohol(IPA) na kapacitu. Materiál s použitím isopropylalkoholu som dosiahol lepšiu zmáčivosť materiálu a viac ako dvojnásobnú kapacitu oproti materiálu bez použitia isopropylalkoholu.

Ďalšie materiáli sme upravovali technológiou žíhaní. Použili sme k tomu materiál Vulcan a expandovaný grafit. Pri týchto materiáloch sme dosiahli nie príliš veľkých kapacít. U vulcanu to bolo 13,7 F/g u expandovaného grafitu to bolo okolo 23,64 F/g.

Ďalšou technológiou úpravy uhlíku bolo spracovanie materiálu s kyselinami. Využili sme kyselinu chlorovodíkovú a kyselinu peroxosírovú. U materiálu s použitou kyselinou chlorovodíkovou sme dosiahli najmenších kapacít a to v príprave s varením nám vyšla kapacita 3,02 F/g a bez varenia 3,01 F/g. Rovnako ani kyselina peroxosírová nám neovplyvnila náš materiál a dosiahli sme kapacít 10,1 F/g a 14,8 F/g.

Materiál Black Pearls 2000 boli miniatúrne guľičky, ktoré som musel najskôr podrviť na jemný prášok, aby som tým mohol ďalej pracovať. Výsledná kapacita nebola príliš veľká, dosiahol som 7,83 F/g.

U nanoštruktúr 632B a 632C som dosiahol kapacít a to 38,3F/g a 35,3F/g, na rozdiel od nanosorbu kde som dosiahol kapacitu 56,4 F/g. Rovnako vysokých kapacít som dosiahol u nanotrubic 1 až 4. Najvyššiu kapacitu som dosiahol s nanotrubicami 2 (Vonkajší priemer (OD) – 60-100nm, Vnútorý priemer(ID) – 5-10nm, dĺžka – 0,5 – 500µm, 95+%) a to 53,1 F/g a to bez špeciálnych úprav.

Superkondenzátorom určite patrí budúcnosť. Vyplňujú miesto medzi klasickými kondenzátormi a nabíjacími akumulátormi. Existuje totiž mnoho aplikácií, kde kondenzátory majú malú kapacitu a naopak akumulátory majú pomalé nabíjanie, limitované zaťaženie a krátku životnosť.

5 Prehľad literatury

- [1] Pandolfo, A.G., Hollenkamp, A.F.: *Carbon properties and their role in supercapacitors*, Journal of power sources 157, 2006
- [2] Bartovská, L., Šišková, M.: *Elektrická dvojvrstva*, 2005
- [3] Datsyuk V., Kalyva M., Papagelis K., Parthenios K., Tasis D., Siokou A., Kallitsis I., Galiotis C.: *Chemical oxidation of multiwalled carbon nanotubes*, Carbon (2008)
- [4] Šulc, R.: *Elektrochemie*, Praha, 2006
- [5] Štěpánek, M.: *Superkondenzátory na bázi expandovaného grafitu – Diplomová práca*, 2005
- [6] Grégr, J.: *Moderní pohled na formy a modifikace uhlíku*
- [7] Frackowiak, E., Beguin, F.: *Carbon materials for the electrochemical storage of energy in capacitors*, Carbon 39, 2000
- [8] Barek, J., Opekar, F., Štulík, K.: *Elektroanalytická chémie*, Praha, 2005