

НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ

Предмет: Реферат о урађеној докторској дисертацији кандидата Петра Лаушевића

Одлуком 5050/12-3. бр. од 18.06.2021. године, именовани смо за чланове Комисије за преглед, оцену и одбрану докторске дисертације кандидата **Петра Лаушевића** под насловом

„Синтеза, карактеризација и моделовање флексибилних суперкондензатора“

После прегледа достављене Дисертације и других пратећих материјала и разговора са Кандидатом, Комисија је сачинила следећи

РЕФЕРАТ

1. УВОД

1.1. Хронологија одобравања и израде дисертације

Петар Лаушевић је школске 2012/2013 уписао докторске академске студије Електротехнике и рачунарства, модул Електроника, на Електротехничком факултету Универзитета у Београду. Све испите предвиђене планом докторских студија положио је са просечном оценом 9.8.

Кандидат је 05.04.2018. године пријавио тему за израду докторске дисертације под насловом „Синтеза, карактеризација и моделовање флексибилних суперкондензатора“. За ментора предложен је др Предраг Пејовић, редовни професор Електротехничког факултета Универзитета у Београду.

Комисија за студије трећег степена Електротехничког факултета Универзитета у Београду разматрала је 10.04.2018. године предлог теме за израду докторске дисертације и упутила предлог Комисије за оцену подобности теме и кандидата на усвајање Наставно-научном већу Електротехничког факултета Универзитета у Београду. Наставно-научно веће Електротехничког факултета Универзитета у Београду именовало је Комисију за оцену научне заснованости теме докторске дисертације (Одлука бр. 5050/12-1 од 26.04.2018. године).

На јавној усменој одбрани теме докторске дисертације, одржаној 04.05.2018. године, кандидат Петар Лаушевић успешно је положио докторски испит са оценом „задовољно“.

Наставно-научно веће Електротехничког факултета Универзитета у Београду усвојило је Извештај Комисије за оцену научне заснованости теме докторске дисертације (Одлука бр. 5050/12-2 од 12.06.2018. године). За ментора дисертације именован је др Предраг Пејовић, редовни професор. Веће научних области техничких наука дало је сагласност на предлог теме докторске дисертације (Одлука број 61206-2721/2-18 од 25.06.2018. године).

Кандидат је 27.05.2021. године предао докторску дисертацију на преглед и оцену. Комисија за студије трећег степена потврдила је 01.06.2021. године испуњеност потребних услова за подношење предлога за формирање Комисије за преглед и оцену докторске дисертације Наставно-научном већу Електротехничког факултета Универзитета у Београду. Наставно-научно веће Електротехничког факултета Универзитета у Београду именовало је Комисију за преглед и оцену докторске дисертације под насловом „Синтеза, карактеризација и моделовање флексибилних суперкондензатора“ (Одлука бр. 5050/12-3 од 18.06.2021. године).

Кандидат Петар Лаушевић започео је докторске студије 2012. године. На основу члана 101. Статута Универзитета у Београду, члана 74. Статута Универзитета у Београду-Електротехничког факултета и захтева студента, одобрено је продужење рока за завршетак студија до истека троструког броја школских година потребних за реализацију уписаног студијског програма.

1.2. Научна област дисертације

Докторска дисертација кандидата Петра Лаушевића под насловом „**Синтеза, карактеризација и моделовање флексибилних суперкондензатора**“ припада научној области Техничке науке-Електротехника, ужој научној области Енергетска електроника, за коју је матичан Електротехнички факултет Универзитета у Београду. За ментора докторске дисертације одређен је др Предраг Пејовић, редовни професор Електротехничког факултета Универзитета у Београду, који се дужи период бави истраживањима у ужој научној области Енергетска електроника којом се бави предметна докторска дисертација.

1.3. Биографски подаци о кандидату

Петар Лаушевић рођен је 1984. године у Београду. Основне академске и мастер студије завршио је на Електротехничком факултету Универзитета у Београду на одсеку за Електроника. Од 2013. године запослен је у Лабораторији за физичку хемију Института за нуклеарне науке „Винча“. Од 2018. године, поред рада у Институту „Винча“, запослен је и у Центру за промоцију науке у сектору за међународну сарадњу.

Учествовао је на пројекту „Водонична енергија“ (финансиран од стране Министарства просвете, науке и технолошког развоја РС). У периоду 2013-2015. године имао је активно учешће у оквиру Европског ФП7 пројекта „*Efficient use of resources in energy converting applications*“. Учествовао је на пројекту „Водонични едукативни сет – H2EduS“ (Фонда за иновациону делатност / Доказ концепта). Учествовао је у COST акцији, „*Electrochemical processing methodologies and corrosion protection for device and systems miniaturization*“, 2016-2018. У оквиру ове COST акције 2017. боравио је у GSI Helmholtz центру у Дармштаду, Немачка, где је радио на пројекту „*Ion-track technology for high performance supercapacitors*“.

Бави се научноистраживачким радом везаним за испитивање и развој нових материјала за електроде флексибилних суперкондензатора и каталитичких материјала за примену у горивним ћелијама са протонски проводним мембранама и алкалним електролизерима. Објавио је 7 радова у научним часописима међународног значаја, 16 радова на међународним научним скуповима као и два техничка решења. Добитник је награда за најбољу презентацију на конференцији *YRC-Materials Science and Engineering*, Београд, 2017., и за најбољу постер презентацију на YUCOMAT 2017, Херцег Нови, Црна Гора.

2. ОПИС ДИСЕРТАЦИЈЕ

2.1. Садржај дисертације

Докторска дисертација кандидата Петра Лаушевића под насловом „Синтеза, карактеризација и моделовање флексибилних суперкондензатора“ написана је на српском језику латиничним писмом и има 93 страна. Садржи 42 слике, 5 табела, 19 једначина и 104 библиографске референце. Докторска дисертација садржи насловну страну на српском и енглеском језику, страну са подацима о ментору и члановима комисије, кратак резиме докторске дисертације на српском и енглеском језику, садржај, осам тематских поглавља, преглед коришћене литературе, биографију аутора и прилоге. Поглавља докторске дисертације су насловљена на следећи начин: 1. Увод, 2. Суперкондензатори - принцип рада, карактеристике и примене, 3. Моделовање суперкондензатора, 4. Синтеза електродног материјала за флексибилне суперкондензаторе коришћењем методе јонских трагова, 5. Методе за карактеризацију суперкондензатора, 6. Експериментални резултати и дискусија, 7. Лабораторијски прототип флексибилног суперкондензатора са електродама од активираниог угљеника са јонским траговима и 8. Закључак. Докторска дисертација садржи следеће прилоге: Прилог 1 Изјава о ауторству, Прилог 2 Изјава о истовестности штампане и електронске верзије докторске дисертације, и Прилог 3 - Изјава о коришћењу.

2.2. Кратак приказ појединачних поглавља

1. *Увод* - уводно поглавље разматра проблем складиштења енергије, као један од главних изазова савременог друштва.

2. *Суперкондензатори - принцип рада, карактеристике и примене* - у овом поглављу су детаљно представљени принцип рада, карактеристике и подела суперкондензатора са прегледом унутрашње структуре ових електричних компоненти и посебним освртом на електроде и електролите.

3. *Моделовање суперкондензатора* - у оквиру трећег поглавља дат је преглед и истакнут значај прецизних електричних модела суперкондензатора.

4. *Синтеза електродног материјала за флексибилне суперкондензаторе коришћењем методе јонских трагова* - у оквиру овог поглавља представљен је поступак синтезе материјала за електроде флексибилних суперкондензатора коришћењем методе јонских трагова. Овај нови материјал, развијен у оквиру ове дисертације, назван је активирани угљеник са јонским траговима.

5. *Методе за карактеризацију суперкондензатора* - пето поглавље представља детаљан преглед метода за карактеризацију суперкондензатора.

6. *Експериментални резултати и дискусија* - у оквиру овог поглавља дати су експериментални резултати синтезе и детаљне карактеризације новог електродног материјала, насталог као резултат ове дисертације. Представљени су резултати морфолошке и текстуралне карактеризације са испитивањем површинске хемије електрода и савитљивости електроде. Највећа пажња посвећена је електрохемијској карактеризацији са нагласком на повезивању параметара електроде попут специфичне површине електроде, расподеле пора и температуре на капацитивност као и на фреквенцијски и временски одзив суперкондензатора.

7. *Лабораторијски прототип флексибилног суперкондензатора са електродама од активираниог угљеника са јонским траговима* - у седмом поглављу представљен је лабораторијски прототип флексибилног суперкондензатора да би се демонстрирала реална примена синтетисаног материјала у флексибилној електроници.

8. *Закључак* - у оквиру завршног поглавља изложена су закључна разматрања ове докторске дисертације.

3. ОЦЕНА ДИСЕРТАЦИЈЕ

3.1. Савременост и оригиналност

Докторска дисертација кандидата Петра Лаушевића припада области складиштења енергије. Због великих димензија уређаја за складиштење енергије, у односу на димензије електронских система, проблеми око складиштења енергије представљају уско грло код развоја нових електричних уређаја а складиштење енергије постаје један од главних изазова савременог друштва. Будућност ће морати да донесе нове концепте складиштења енергије који ће пратити зехтеве за енергијом нових електронских уређаја који ће бити флексибилни, носиви и уградиви у наш организам. Ова дисертација бави се развојем нових уређаја за складиштење енергије који су флексибилни (савитљиви). Током претходних десет година узбудљива нова истраживања су покренута за проналажење нових и ефикаснијих електроодних материјала и унапређење технологије флексибилних видова складиштења енергије, о чему сведочи изузетно велики број објављених научних радова у релевантним часописима.

Оригиналност рада презентованог у овој докторској дисертацији огледа се у развоју потпуно новог флексибилног самоносивог угљеничног танаког филма за електроде суперкондензатора са великом запреминском и површинском капацитивношћу. Повећање капацитивности постигнуто је увођењем канала у угљенични танак филм коришћењем технологије јонских трагова. Развијени нови материјал назван је активирани угљеник са јонским траговима. Као последица формирања канала повећана је капацитивност и брзина суперкондензатора, док је током тестирања од 10 000 циклуса пуњења и пражњења показана изузетна стабилност капацитивности. Кроз ову дисертацију истакнут је значај интердисциплинарног приступа који повезује знања из науке о материјалима и електрохемије са електротехником зарад дизајна нових уређаја за будуће примене у флексибилној електроници. Посебна вредност овог доктората је развијени лабораторијски прототип флексибилног кондензатора са електродама насталим у оквиру ове дисертације.

3.2. Осврт на референтну и коришћену литературу

Током израде докторске дисертације кандидат је детаљно истражио постојећу релевантну литературу, која покрива посматрану научну област. Значајан број радова новијег је датума што указује на актуелност одабране проблематике. На основу обима коришћене литературе може се закључити да је кандидат имао темељан увид у досадашње доприносе у овој и блиским научним областима. Наведено је укупно 104 библиографских референци.

3.3. Опис и адекватност примењених научних метода

Методологија истраживања у оквиру докторске дисертације састојала се од следећих активности:

Синтеза материјала коришћењем технологије јонских трагова

- Озрачивање полазне Каптон фолије јонима криптона и синтеза полимера са латентним јонским траговима.
- Хемијско ецовање полимера са латентним јонским траговима.
- Карбонизација и активација полимера са јонским траговима.

Карактеризација суперкондензатора

- Морфолошка и текстурална карактеризација са испитивањем површинске хемије електрода.
- Испитивање савитљивости добијених електрода.
- Карактеризација у временском домену методама цикличне волтаметрије и пуњења/пражњења константном струјом.
- Карактеризација у фреквенцијском домену методом електрохемијске импедансне спектроскопије.
- Карактеризација електрода развијених у оквиру дисертације у широком температурном опсегу.

Моделовање добијених експерименталних резултата коришћењем електричног модела двоструког електричног слоја базираног на Грејамовој теорији.

Прављење лабораторијског прототипа суперкондензатора са електродама од активирног угљеника са јонским траговима.

Примењена методологија у потпуности одговара стандардима научно-истраживачког рада и довела је до остваривања цијева докторске дисертације.

3.4. Применљивост остварених резултата

Електродни материјал под називом активирани угљеник са јонским траговима, развијен у оквиру дисертације Петра Лаушевића, показао је одлична својства и као такав је добар кандидат у применама за електроде флексибилних суперкондензатора. Могућност комерцијалне примене синтетисаног материјала у флексибилној електроници представљена је у овој дисертацији кроз лабораторијски прототип флексибилног суперкондензатора

3.5. Оцена достигнутих способности кандидата за самостални научни рад

На основу прегледане докторске дисертације Комисија процењује да је кандидат Петар Лаушевић показао способност за самосталан научно-истраживачки рад од систематичног прегледа доступне научне литературе, преко уочавања практичних проблема развоја нових флексибилних уређаја за складиштење енергије, од синтезе и карактеризације новог електродног материјала, анализе добијених резултата и представљања лабораторијског прототипа. Начин на који је писана докторска дисертација и доприноси који су у њој представљени указују на зрелост кандидата за самосталан научно-истраживачки рад. Резултате истраживања у оквиру докторске дисертације кандидат је публикувао, као први аутор у часопису од међународног значаја и на међународним конференцијама.

4. ОСТВАРЕНИ НАУЧНИ ДОПРИНОС

4.1. Приказ остварених научних доприноса

Остварени научни доприноси, у оквиру докторске дисертације Петра Лаушевића, огледају се у развоју новог поступка за синтезу електрода флексибилних суперкондензатора. Зрачењем комерцијалне Каптон фолије јонима криптона високе енергије, и накнадним хемијским ецовањем дуж уписаних јонских трагова показано је да је могуће фармирање канали различите геометрије по пресеку електроде. Накнадно, једноставним и једностепеним, поступком карбонизације и активације у CO_2 атмосфери произведен је потпуно нов електродни материјал од активираниог угљеника за флексибилне суперкондензаторе, коме је дат назив активираниог угљеник са јонским траговима (*Activated Ion-Track Carbon A-ITC*). Под благим условима активације од 40 мин на $910\text{ }^\circ\text{C}$ у CO_2 атмосфери настају искључиво субнанометрске поре, са просечном величином поре од 0.62 nm , у танком површинском слоју. Додавањем канала у структуру електрода омогућена је активација унутар материјала око површине канала и повећана, претежно микропорозна, површина у контакту са електролитом. Као резултат повећан је запремински, површински и гравиметријски капацитет електрода флексибилних кондензатора. Такође, показано је да процес формирања канала утиче на састав површинских функционалних група које доприносе капацитивности. Највећи капацитети (површински - 494 mF/cm^2 , запремински - 224 F/cm^3 и гравиметријски - 178 F/g) добијени су за узорке хемијски нагрисане у дужини од 40 минута. Увођењем канала кроз танку филм электроду такође је повећана брзина суперкондензатора. При циклирању *A-ITC* узорака током 10 000 циклуса пуњења и пражњења показана је изванредна стабилност капацитивности.

4.2. Критичка анализа резултата истраживања

У оквиру докторске дисертације Петра Лаушевића синтетисан је потпуно нов материјал за електроде суперкондензатора са повећаном гравиметријском, површинском и запреминском капацитивношћу. Ови резултати постигнути су увођењем канала у електроде коришћењем технологије јонских трагова. У поређењу са подацима из литературе, површински и запремински капацитивност добијена за *A-ITC-40* је међу највишим објављеним резултатима за активирани угљеник упоредива је са графеном и угљеничним наноцевима. Важно је истаћи да је добијени материјал самоносиви, без додатих везива и проводних адитива. Важно је навестити да је материјал добијен полазећи од комерцијалне Каптон фолије која се озрачује у индустријским размерама и доступна је на тржишту. На основу ових резултата можемо закључити да су електроде *A-ITC* обећавајући материјал за танке

филм и флексибилне суперкондензаторе. Важно је истаћи да постоји много могућности за даље побољшање својстава *A-ITC* оптимизацијом облика, димензија, оријентације и густине канала, као и дебљине почетне полимерне фолије. Кроз ову дисертацију истакнут је значај интердисциплинарног приступа при дизајнирању нових уређаја за складиштење енергије за флексибилну електронику. Посебна вредност овог доктората је развијени лабораторијски прототип флексибилног кондензатора са *A-ITC* електродама. Резултати изнети у дисертацији представљају значајан научни допринос у области енергетске електронике.

Комисија констатује да су научни доприноси остварени у докторској дисертацији објављени у научном часопису од међународног значаја категорије M22, као и зборницима међународног значаја.

4.3. Верификација научних доприноса

Радови објављени у научним часописима међународног значаја

M22 - Истакнути међународни часопис

- [1] **P. Laušević**, P. Pejović, D. Žugić, Y. Kochnev, P. Apel, and Z. Laušević, "Improving thin film flexible supercapacitor electrode properties using ion-track technology," *J. Mater. Sci. Mater. Electron.*, pp. 1–12, Feb. 2018. <https://doi.org/10.1007/s10854-018-8740-x>

Радови са међународних научних скупова

M33 - Саопштење са међународног скупа штампано у целини

- [1] **P. Laušević**, M. Marčeta-Kaninski, V. Nikolić, P. Predrag, Modeling of electrochemical double-layer capacitors, *1st Workshop on Materials Science for Energy Related Application*, University of Belgrade, Faculty of Physical Chemistry, Belgrade, Serbia, 26. - 27. Sep, 2014.
- [2] G. Tasić, **P. Laušević**, I. Perović, S. Miulović, V. Nikolić, M. Marčeta-Kaninski, Independent power and energy sources for military applications, *6th International Scientific Conference on Defensive Technologies – OTEH 2014*, Vojnotehnički institut, Belgrade, Serbia, 9. - 10. Oct, 2014.

M34 - Саопштење са међународног скупа штампано у изводу

- [3] **P. Laušević**, D. Žugić, Y. Kochnev, P. Apel, Z. Laušević, Ion-track technology for high-performance thin film supercapacitor electrodes, *EAST forum 2017*, Schwäbisch Gmünd, Germany, 7. - 7. Apr, 2017
- [4] **P. Laušević**, M. Marčeta Kaninski, V. Nikolić, P. Apel, M. Toimil-Molares, Z. Laušević, Influence of electrode thickness on the electrochemical properties of activated ion-track carbon supercapacitors, *19th Annual Conference, YUCOMAT*, Herceg Novi, Montenegro, 4. - 8. Septembar, 2017.
- [5] **P. Laušević**, N. Elezović, Z. Laušević, P. Apel, Mercedes Alicia Carrillo Solano, Maria Eugenia Toimil-Molares, Ion-track technology for high-performance supercapacitors, *3rd COST Workshop, COST Action MP1407*, Universitat Autònoma de Barcelona (UAB), Barcelona, Spain, 24. - 27. Oct, 2017.
- [6] **P. Laušević**, P. Pejović, V. Nikolić, Z. Laušević, M. Toimil-Molares, Activated ion-track carbon flexible supercapacitor electrodes with different channel densities, *16th*

Young Researchers' Conference – Materials Science and Engineering, Belgrade, Serbia, 6. - 8. Dec, 2017.

- [7] Z. Laušević, D. Žugić, **P. Laušević**, Y. Kochnev, P. Apel, Monolithic track etched carbon thin films for supercapacitors, *Carbon 2016 Conference*, State College, Pennsylvania, USA, 10. - 15. Jul, 2016.
- [8] **P. Laušević**, P. Pejović, D. Žugić, Y. Kochnev, P. Apel, Z. Laušević, Activated track etched carbon for supercapacitor electrodes, *18th Annual Conference, YUCOMAT*, Herceg Novi, Montenegro, 5. - 10. Sep, 2016.
- [9] **P. Laušević**, M. Marčeta-Kaninski, V. Nikolić, Z. Laušević, P. Pejović, Influence of temperature and electrolyte concentration on the performance of flexible supercapacitors, *15th Young Researchers' Conference – Materials Science and Engineering*, Belgrade, Serbia, 7. - 9. Dec, 2016.
- [10] **P. Laušević**, M. Marčeta-Kaninski, V. Nikolić, Z. Laušević, P. Pejović, Impedance study and modeling of kapton derived thin film supercapacitors, *Carbon 2016 Conference*, State College, Pennsylvania, USA, 10. - 15. Jul, 2016.
- [11] **P. Laušević**, M. Marčeta-Kaninski, V. Nikolić, Z. Laušević, M. Bjelica, P. Pejović, Novel thin film supercapacitors, *18th International Symposium on Power Electronics - Ee2015*, Novi Sad, Serbia, 28. - 30. Oct, 2015.
- [12] **P. Laušević**, M. Marčeta-Kaninski, V. Nikolić, I. Perović, Đ. Šaponjić, M. Adžić, P. Pejović, A Voltage Degradation Model For PEM Fuel Cells, *17th International Symposium on Power Electronics - Ee2013*, Novi Sad, Serbia, 30. Oct - 1. Nov, 2013.

5. ЗАКЉУЧАК И ПРЕДЛОГ

Докторска дисертација кандидата Петра Лаушевића под насловом „Синтеза, карактеризација и моделовање флексибилних суперкондензатора“ написана је у складу са образложењем наведеним у пријави теме и садржи све битне елементе који се захтевају Правилником о докторским студијама Електротехничког факултета Универзитета у Београду.

У оквиру ове дисертације уведен је нови поступак за синтезу електрода флексибилних суперкондензатора коришћењем технологије јонских трагова. Додавањем канала у структуру електрода омогућена је активација унутар материјала око површине канала и повећана, претежно микропорозна, површина у контакту са електролитом. Као резултат повећан је запремински, површински и гравиметријски капацитет електрода флексибилних кондензатора. Такође, показано је да процес формирања канала утиче на састав површинских функционалних група које доприносе капацитивности. Увођењем канала кроз танку филм электроду такође је повећана брзина суперкондензатора и показана је изванредна стабилност капацитивности при вишеструком пуњењу и прежњењу. На основу ових резултата можемо закључити да су електроде развијене у оквиру ове дисертације обећавајући материјал за танке филм и флексибилне суперкондензаторе. Кроз ову дисертацију истакнут је значај интердисциплинарног приступа при дизајнирању нових уређаја за складиштење енергије за флексибилну електронику. Посебна вредност овог доктората је развијени лабораторијски прототип флексибилног кондензатора са електродама од активираниог угљеника са јонским траговима. Резултате проистекле из истраживања спроведеног у оквиру докторске дисертације кандидат је објавио у истакнутом међународном часопису и презентовао стручној јавности на конференцијама међународног значаја. На основу увида у докторску дисертацију и објављене радове кандидата, Комисија констатује да докторска дисертација

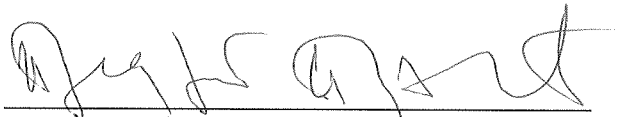
представља оригиналан и савремен научни допринос у домену енергетске електронике.

Кандидат Петар Лаушевић показао је способност за самосталан научни рад, што потврђује и чињеница да је објавио неколико научних радова који су проистекли из дисертације. Комисија констатује да је кандидат Петар Лаушевић, мастер инжењер електротехнике и рачунарства, испунио све услове предвиђене Законом о високом образовању, Статутом и Правилником о докторским студијама Електротехничког факултета Универзитета у Београду.

Имајући у виду наведено, Комисија са задовољством предлаже Наставно-научном већу Електротехничког факултета Универзитета у Београду да се докторска дисертација под називом „**Синтеза, карактеризација и моделовање флексибилних суперкондензатора**“ кандидата **Петра Лаушевића** прихвати, изложи на увид јавности и упути на коначно усвајање Већу научних области техничких наука Универзитета у Београду.

У Београду, 23.06.2021. године

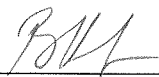
ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ



др Предраг Пејовић, редовни професор
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет



др Јован Микуловић, редовни професор
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет



др Владимир Николић, научни саветник
Институт за општу и физичку хемију у Београду