

**ЗАХТЕВ**

**за давање сагласности на реферат о урађеној докторској дисертацији**

Молимо да, сходно члану 47. ст. 5. тачка 4. Статута Универзитета у Београду (“Гласник Универзитета у Београду” број 162/11, пречишћен текст, 167/12, 172/13 и 178/14), дате сагласност на реферат о урађеној докторској дисертацији кандидата:

**Даниела (Милан) Мијаиловића**, мастер инжењера

КАНДИДАТ: **Даниел Мијаиловић** пријавио је докторску дисертацију под називом:  
„Порозне електроде на бази угљеничних влакана и спинела прелазних метала за примену у складиштењу електричне енергије“

Из научне области: **Технолошко инжењерство**

Универзитет је дана **28. 01. 2021.** године, својим актом **61206-256/2-21**, дао сагласност на предлог теме докторске дисертације која је гласила:

„Порозне електроде на бази угљеничних влакана и спинела прелазних метала за примену у складиштењу електричне енергије“

Комисија за оцену и одбрану докторске дисертације кандидата **Даниела Мијаиловића** образована је на седници Наставно-научног већа одржаној **29. 12. 2022.** године Одлуком Факултета под бр. **35/332**, у саставу:

| Име и презиме                     | Звање                     | Научна област                    |
|-----------------------------------|---------------------------|----------------------------------|
| 1. Др Петар Ускоковић             | Редовни професор          | Инжењерство материјала           |
| 2. Академик др Велимир Радмиловић | Научни саветник у пензији | Металургија и метални материјали |
| 3. Др Душица Стојановић           | Научни саветник           | Инжењерство материјала           |
| 4. Др Урош Лачњевац               | Научни саветник           | Електрохемија и наноматеријали   |
| 5. Др Вук Радмиловић              | Доцент                    | Инжењерство материјала           |

Студент је уписан на докторске студије школске 2014/2015. године.

На захтев студента, у складу са Статутом Универзитета у Београду и Статутом Факултета, декан је донео Решење бр. 20/181 од 29.09.2020. године о продужењу рока за завршетак студија до истека троструког броја школских година потребних за реализацију уписаног студијског програма, односно до краја школске 2022/2023. године.

Наставно-научно веће Факултета прихватило је реферат Комисије за оцену и одбрану докторске дисертације на седници одржаној дана **02.02.2023.** године.

ДЕКАН ФАКУЛТЕТА

Проф. др Петар Ускоковић

Бр. 20/181

29. 09. 2020 год.

На основу члана 101. Статута Универзитета у Београду ("Гласник Универзитета у Београду бр. 201/2018") и члана 76. став 1. и став 4. Статута Технолошко-металуршког факултета у Београду, као и захтева студента за продужење рока за завршетак студија Декан доноси

## РЕШЕЊЕ

### о продужењу рока за завршетак студија

Студенту Даниелу Мијаиловићу, број индекса 4005/2014, уписаном-ој у прву годину докторских академских студија школске 2014/2015. године, продужава се рок за завршетак студија до истека троструког броја школских година потребних за реализацију уписаног студијског програма, односно до краја школске 2022/2023. године.

#### *Поука о правном леку:*

Против овог решења именовани-а може поднети жалбу Савету Факултета у року од 8 дана од дана пријема решења.

#### Доставити:

- Студенту;
- Служби за студентска питања;
- Општој служби – архиви.

ДЕКАН

  
Проф. др Петар Ускоковић

На основу чл. 40. став 3. Закона о високом образовању, чл. 112. став 3. Статута Универзитета у Београду, чл. 88. став 3. Статута ТМФ-а и чл. 39. Правилника о докторским студијама ТМФ, на седници Наставно-научног већа Технолошко-металуршког факултета од 02.02.2023. године, донета је

## О Д Л У К А

о прихватању Реферата о оцени докторске дисертације

Прихвата се Реферат Комисије у саставу: др Петар Ускоковић, редовни професор Универзитета у Београду, Технолошко-металуршки факултет, академик др Велимир Радмиловић, научни саветник у пензији Универзитета у Београду, Технолошко-металуршки факултет, др Душица Стојановић, научни саветник Универзитета у Београду, Технолошко-металуршки факултет, др Урош Лачњевац, научни саветник Универзитета у Београду, Институт за мултидисциплинарна истраживања и др Вук Радмиловић, доцент Универзитета у Београду, Технолошко-металуршки факултет, о прегледу и оцени урађене докторске дисертације под називом: **„Порозне електроде на бази угљеничних влакана и спинела прелазних метала за примену у складиштењу електричне енергије”** коју је поднео **Даниел Мијаиловић**, мастер инжењер и упућује се на сагласност Већу научних области техничких наука Универзитета у Београду.

Веће научних области техничких наука Универзитета у Београду дало је сагласност на предлог теме докторске дисертације Даниела Мијаиловића, под називом **„Порозне електроде на бази угљеничних влакана и спинела прелазних метала за примену у складиштењу електричне енергије ”** Одлуком број: 61206-256/2-21 од 28.01.2021. године.

Верификација научних доприноса:

### Категорија M21a:

**1. Mijailović D.M.**, Radmilović V.V., Lačnjevac U.Č., Stojanović D.B., Jović V.D., Radmilović V.R., Uskoković P.S.: *Core-shell carbon fiber@Co<sub>1.5</sub>Mn<sub>1.5</sub>O<sub>4</sub> mesoporous spinel electrode for high performance symmetrical supercapacitors*, - Applied Surface Science, Vol 534, 2020, 147678, pp. 1-11; IF 6.707; ISSN: 0169-4332; doi: 10.1016/j.apsusc.2020.147678.

### Категорија M22:

**1. Mijailović D.M.**, Vukčević M.M., Stević Z.M., Kalijadis A.M., Stojanović D.B., Panić V.V., Uskoković P.S.: *Supercapacitive Performances of Activated Highly Microporous Natural Carbon Macrobundles*, - Journal of The Electrochemical Society, Vol 164, 2017, pp. A1061-A1068; IF: 4.099; ISSN: 1945-7111; doi: 10.1149/2.0581706jes.

**2. Mijailović D.M.**, Radmilović V.V., Lačnjevac U.Č., Stojanović D.B., Bustillo K.C., Jović V.D., Radmilović V.R., Uskoković P.S., *Tetragonal CoMn<sub>2</sub>O<sub>4</sub> nanocrystals on electrospun carbon fibers as high-performance battery-type supercapacitor electrode materials*, - Dalton Transactions, Vol 50, 2021, pp. 15669–15678; IF: 4.569; ISSN: 1477-9234; doi: 10.1039/D1DT02829D.

Одлуку доставити: Већу научних области техничких наука Универзитета, ментору, Служби за наставно-студентске послове, Библиотеци и Архиви факултета.

Д Е К А Н

Проф. др Петар Ускоковић

**НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ**

**Предмет:** Реферат о урађеној докторској дисертацији кандидата Даниела М. Мијаиловић, мастер инж. технологије

Одлуком Наставно-научног већа Технолошко-металуршког факултета, Универзитета у Београду, бр. 35/332 од 29.12.2022. године, именовани смо за чланове Комисије за преглед, оцену и одбрану докторске дисертације кандидата Даниела М. Мијаиловић, мастер инж. технологије, под насловом:

**„Порозне електроде на бази угљеничних влакана и спинела прелазних метала за примену у складиштењу електричне енергије“**

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**

- 06.11.2014. године кандидат Даниел М. Мијаиловић, мастер инж. технологије, уписао је докторске студије на Технолошко-металуршком факултету, Универзитета у Београду. Након положених испита предвиђених студијским програмом Инжењерство материјала са просечном ценом 10,00 започео је истраживање које је предмет његове докторске дисертације. Истовремено је и ангажован на пројекту Министарства за науку и технолошки развој Републике Србије под насловом „Синтеза, развој технологија и примена наноструктурних мултифункционалних материјала дефинисаних својстава“, евиденциони број III 45019, у оквиру кога је урађен највећи део истраживања која су предмет дисертације.
- Од 01.10.2017. године запослен је на Иновационом центру Технолошко-металуршког факултета, Универзитета у Београду, најпре као истраживач приправник од 06.07.2018. године, а касније и као истраживач сарадник.
- 05.11.2020. године на предлог Катедре за конструкционе и специјалне материјале, Технолошко-металуршког факултета, Наставно-научно веће факултета је усвојило предлог Комисије за оцену подобности теме, у саставу др Петар Ускоковић, ред. проф. ТМФ, академик др Велимир Радмиловић, научни саветник у пензији ТМФ, др Душица Стојановић, научни саветник ТМФ, др Урош Лачњевац, научни саветник Института за мултидисциплинарна истраживања, др Вук Радмиловић, доцент ТМФ. Одлука 35/314 од 05.11.2020.
- 24.12.2020. године на седници Наставно-научног већа ТМФ, донета је одлука о прихватању Реферата Комисије за оцену подобности теме и кандидата за израду докторске дисертације, и за ментора је одређен др Петар Ускоковић, ред. проф. ТМФ. Одлука 35/391 од 24.12.2020.

- 22.11.2021. године Веће научних области техничких наука Универзитета у Београду је донело одлуку по којој даје сагласност на предлог теме докторске дисертације кандидата Даниела М. Мијаиловић, мастер инж. технологије под називом „Порозне електроде на бази угљеничних влакана и спинела прелазних метала за примену у складиштењу електричне енергије“. Одлука 02 бр: 61206-256/2-11 од 28.01.2021.
- Од 01.10.2022. године кандидат Даниел М. Мијаиловић је запослен на Технолошко-металуршком факултету у звању асистента на Катедри за конструкционе и специјалне материјале, у које је изабран на Изборном већу ТМФ 15.09.2022. одлуком бр 36/26.
- 29.12.2022. године на седници Наставно-научног већа ТМФ, донета је одлука о именовању чланова Комисије за оцену и одбрану докторске дисертације кандидата Даниела М. Мијаиловић, мастер инж. технологије, под називом „Порозне електроде на бази угљеничних влакана и спинела прелазних метала за примену у складиштењу електричне енергије“, Одлука бр. 35/332 од 29.12.2022.

## 1.2. Научна област дисертације

Истраживања у оквиру ове докторске дисертације припадају научној области Технолошко инжењерство, ужа научна област Инжењерство материјала, за коју је матичан Технолошко-металуршки факултет Универзитета у Београду. На основу објављених радова у наведеној научној области и досадашњег искуства у научно-истраживачком раду, констатујемо да су именовани чланови Комисије компетентни да руководе изразом ове докторске дисертације.

## 1.3. Биографски подаци о кандидату

Даниел М. Мијаиловић је рођен 07.10.1990. године у Руми. Основну школу „Слободан Бајић Паја“ завршио је у Пећинцима као носилац Вукове дипломе и Ђак генерације. Општи смер гимназије у Старој Пазови завршио је 2009. године као носилац Вукове дипломе. Основне студије на Технолошко-металуршком факултету Универзитета у Београду, студијски програм Инжењерство материјала, завршио је 2013. године, са просечном оценом 9,92. Завршни рад са насловом „Добијање и карактеризација активних и пасивних слојева органских соларних ћелија“ одбранио је на Катедри за конструкционе и специјалне материјале, под менторством проф. др Петра Ускоковића. Током основних студија, боравио је на Католичком универзитету у Лувену, где се бавио дизајнирањем и карактеризацијом композитних материјала примењених у спорту. Мастер студије је завршио 2014. године са просечном оценом 10,00, одбраном мастер рада „Полимерна нановлакна добијена електропретварањем и могућности коришћења у контролисаном достављању лекова“, на истој катедри, под менторством проф. др Петра Ускоковића. Добитник је четири награде Панга Тутунџић, награде Српског хемијског друштва за изузетан успех на студијама и Доситејево награде за најбоље студенте у Србији. Докторске студије на Технолошко-металуршком факултету уписао је 2014. године, уз истовремено ангажовање на пројекту Министарства за науку и технолошки развој Републике Србије ИИИ 45019 „Синтеза, развој технологија и примена наноструктурних мултифункционалних материјала дефинисаних својстава“. У оквиру овог пројекта започео је истраживање у области електрода заснованих на наноструктурним материјалима са применом у складиштењу електричне енергије. У јулу 2018. године је изабран у звање истраживача приправника Иновационог центра, Технолошко-металуршког факултета, да би у априлу 2021. године стекао звање истраживача сарадника. Боравио је на Институту за хемију и технологију материјала Техничког универзитета у Грацу, у оквиру истраживачке групе реномираног научника проф. др Штефана Фројнбергера, где је урадио део експерименталних истраживања за потребе докторске дисертације. Поред тога, бавио се и фундаменталним истраживањима материјала за складиштење електричне енергије у литијум-ваздух секундарним батеријама чији су резултати објављени у престижном часопису Nature Chemistry (IF: 24,274).

Од октобра 2019. године је ангажован у извођењу вежби из предмета Материјали и Композитни материјали, а од октобра 2022. године је изабран на место асистента на Катедри за конструкционе и специјалне материјале, Технолошко-металуршког факултета. Поред два поменута предмета, ангажован је и у извођењу вежби на предметима Функционални композитни материјали и Индустриски дизајн.

Даниел М. Мијаиловић је аутор шест научних радова (три M21a, два M21 и један M22) и бројних саопштења (штампаних у изводу и целини) са националних и међународних конференција. Добитник је награда за најбоље усмено предавање на међународним конференцијама: The 17<sup>th</sup> Young Researchers' Conference (YRC2018), The Young Researchers Conference (YOURS2019) и Electron Microscopy of Nanostructures (ELMINA2022). Добитник је и најбољих постерских саопштења на две међународне конференције - Electrospinning for Energy (ElEn2018) и The 21st Annual Conference on Material Science "YUCOMAT 2019". Учествовао је у e-MINDS електрохемијском програму у оквиру COST акције MP1407.

## **2. ОПИС ДИСЕРТАЦИЈЕ**

### **2.1. Садржај дисертације**

Докторска дисертација кандидата Даниела М. Мијаиловића, мастер инж. технологије, под називом „Порозне електроде на бази угљеничних влакана и спинела прелазних метала за примену у складиштењу електричне енергије“ написана је на 124 стране, у оквиру којих се налази 102 слике, 12 табела, као и 218 литературних навода. Дисертација садржи следећа поглавља: Увод, Теоријске основе, Експериментални део, Резултати, Дискусија резултата, Закључак и будући правци истраживања и Литература. На крају дисертације дата је биографија кандидата, као и потписане изјаве о ауторству, истовестности штампане и електронске верзије докторског рада и о коришћењу, као и потписана Оцена извештаја о провери оригиналности докторске дисертације.

У докторској дисертацији Даниел М. Мијаиловић, мастер инж. технологије, детаљно је изложио структурна и физичко-хемијска својства угљеничних нановлакна и њихових композита са спинелима прелазних метала, који се користе као електродни материјали у уређајима за складиштење електричне енергије. Сходно томе, дат је детаљан преглед најзначајних електрохемијских технологија, са главним освртом на суперкондензаторе и електродне материјале са специфичним механизмима складиштења, као и постојеће проблеме и изазове. Као напредак у процесирању материјала, предложио је комбиновану методу електропоређења полимерних/хибридних прекурсора и термичког третмана у циљу припреме нових електрода са контролисаном морфологијом и кристалном структуром. У дисертацији је објашњен утицај параметара процесирања на физичко-хемијска својства угљеничних/композитних нановлакна, са упоређеним електрохемијским перформансама електрода. Уз детаљну дискусију добијених резултата наглашен је и њихов искорак у односу на до сада објављена истраживања.

### **2.2. Кратак приказ појединачних поглавља**

Увод докторске дисертације указује на проблеме сагоревања фосилних горива, која су и даље доминантни извори примарне енергије, као и на неопходност развоја обновљивих извора који треба да обезбеде производњу електричне енергије. Тако произведену енергију је неопходно складиштити у новим и напреднијим технологијама, у складу са одрживим развојем. Посебно су истакнути суперкондензатори, уређаји који имају способност складиштења и испоручивања велике количине енергије у кратком временском интервалу. Највећи проблем ове технологије јесте ниска густина енергије уређаја, која ограничава њихову ширу комерцијалну примену. Објашњен је предмет и циљ истраживања у правцу развоја нових електродних материјала са побољшаним електрохемијским перформансама.

*Теоријске основе* дисертације приказују детаљна структурна и физичко–хемијска својства угљеничних (нано)vlakana на бази полимера полиакрилонитрила (ПАН). Истакнуто је процесирање самоносивих порозних угљеничних нановлакана путем термичке обраде поменутих полимера. Посебан осврт дат је на електропредење као једне од најједноставнијих и веома ефикасних метода процесирања материјала са високим перформансама. Систематски су изложени релевантни електрохемијски резултати везани за угљенична нановлакна на бази ПАН полимера. Такође су детаљно описане специфичне структуре и физичко–хемијска својства композита сачињених од угљеничних нановлакана и спинела на бази кобалта и мангана који имају примену у суперкондензаторима. Дати су основни принципи рада најзначајнијих електрохемијских технологија за складиштење електричне енергије са истакнутим електроодним материјалима и одговарајућим механизмима, у циљу исправне класификације нових електроодних материјала.

*Експериментални део* докторске дисертације подељен је на три веће целине од којих је прва посвећена процесирању угљеничних нановлакана, угљеничних нановлакана допираних кобалтом и угљенично–спинелних композитних нановлакана, друга њиховој физичко–хемијској карактеризацији, а трећа електрохемијским мерењима која обухватају електрохемијску карактеризацију процесираних материјала. У првом делу, описани су експериментални услови електропредења полимерних/хибридних нановлакана и накнадне термичке обраде према којој су процесирана угљенична/композитна нановлакна. Раствор за електропредење је типично полимерна бленда на бази ПАН и поливинилпирилодон полимера, уз контролисан додатак кобалт/манган металних прекурсора, са циљем добијања композитних нановлакана. Улога металних прекурсора је била да утиче на морфологију нановлакана и формирање спинелне фазе са одговарајућим електрохемијским перформансама. Такође је описано процесирање угљеничних честица карбонизацијом претходно синтетисаног ПАН полимера путем *тзв.* „Schlenk“ методе. У другом делу су дефинисани експериментални услови под којима су изведене физичко–хемијске методе карактеризације: метода рендгенске дифракције (XRD), скенирајућа електронска микроскопија (SEM), конвенционална трансмисиона електронска микроскопија (STEM), високорезолуциона трансмисиона електронска микроскопија (HRTEM), скенирајућа трансмисиона електронска микроскопија (STEM), спектроскопија на бази дисперзије енергије X-зрака (EDS), спектроскопија губитка енергије примарног снопа електрона (EELS), рендгенска фотоелектронска спектроскопија (XPS), инфрацрвена спектроскопија са Фуријеовом трансформацијом (FT–IR), спектроскопија нуклеарне магнетне резонанце ( $^1\text{H}$ NMR), анализа порозности, диференцијална скенирајућа калориметрија (DSC) и термогравиметријска анализа (TGA). На крају су приказани услови припреме електроодних материјала, начини интегрисања у конвенционалне, „новчић“ и *тзв.* „Swagelok“ ћелије, заједно са методама које су коришћене за електрохемијску карактеризацију. Дати су и теоријски аспекти наведених физичко–хемијских и електрохемијских метода.

*Резултати* истраживања докторске дисертације су подељени у четири посебне целине, од којих прва обухвата резултате експеримената везаних за процесирање и карактеризацију самоносивих угљеничних нановлакана и угљеничних нановлакана допираних кобалтом као електрода кондензатора са електричним двојним слојем. Друга, трећа и четврта целина се односе на резултате процесирања и карактеризације угљенично–спинелних композитних нановлакана са различитим фазним саставом спинела, примењене као електроде у кондензаторима са батеријским карактеристикама.

У *дискусији резултата* су прво описана порозна угљенична нановлакна и угљенична нановлакна допирана кобалтом. Потврђена је типична кристална структура угљеничних нановлакана у којој су базалне равни угљеника неправилно сложене, *тзв.* турбостратична структура. Додатком кобалт–ацетатног прекурсора, откривена је равномерна расподела елементарног кобалта на површини угљеничних нановлакана. Објашњен је и утицај прекурсора на порозну структуру и расподелу пора, где је уочено значајно повећање површине у случају бленде полимерних нановлакана у односу на чиста нановлакна.

Угљенична нановлакна са нанокристалима кобалта су показала највећу површину и запремину пора, при чему је добијена нормализована вредност капацитивности по површини од  $18,7 \mu\text{F cm}^{-2}$ , што је више у односу на нормализовану капацитивност комерцијалних активних угљеника, који се при томе додатно активирају различитим физичко–хемијским процесима. Истакнута је и главна предност оваквих угљеничних материјала који су самоносиви и могу да се директно користе као електроде, без додавања проводних материјала и полимерних везива.

У другом делу су описани резултати угљенично–спинелних композитних нановлакна, који по доступној литератури нису до сада процесирани на начин који је приказан у докторској дисертацији. Фазни састав спинела код композитних нановлакна је успешно контролисан варирањем молског односа металних прекурсора, при чему је утврђено формирање следећих спинелних фаза –  $\text{Co}_{1,5}\text{Mn}_{1,5}\text{O}_4$ ,  $\text{CoMn}_2\text{O}_4$  и  $\text{Co}_2\text{MnO}_4$ , средњег пречника између 13 и 60 nm. Демонстрирана је и специфична „језгро–омотач“ структура, где су угљенична нановлакна окружена  $\text{Co}_{1,5}\text{Mn}_{1,5}\text{O}_4$  спинелним прстеновима. Међутим, код осталих узорака спинелни нанокристали су распоређени и унутар угљеничних нановлакна. Мезопорозна структура свих композитних нановлакна је потврђена анализом порозности, при чему је површина у опсегу од 10 до  $40 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$ . Од свих испитаних електрода најбоља својства су показала композитна нановлакна са специфичном „језгро–омотач“ структуром, где је достигнута највиша вредност специфичног капацитета од  $68,2 \text{ mAh g}^{-1}$ . У погледу стабилности при циклизирању, све електроде постижу одличну ретенцију од преко 95%.

*Закључак и будући правци истраживања* дисертације сумирају најважније резултате и њихов допринос предметној области, при чему се кратко даје предлог будућих истраживања.

У поглављу *Литература* дати су сви извори коришћени у току истраживања и наведени у дисертацији.

### 3. ОЦЕНА ДИСЕРТАЦИЈЕ

#### 3.1. Савременост и оригиналност

Растућа свест о очувању животне средине условила је интензивна истраживања и развој безбеднијих и ефикаснијих технологија складиштења електричне енергије. Уређаји који имају способност испоручивања велике количине енергије за веома кратко време и веома дугачак радни век, попут суперкондензатора, веома су атрактивни за примену како у електричним возилима, тако и у преносивим уређајима за напајање мале снаге. Комерцијално доступни суперкондензатори се састоје од две идентичне електроде на бази порозних угљеничних прахова, адитива и везива између којих се налази полимерни сепаратор напашен електролитом. Познато је да перформансе ових уређаја одређују материјали, од којих су сачињене електроде, који могу значајно да утичу на побољшање највећег недостатка ове технологије – ниске густине енергије.

Препознајући овај недостатак као један од главних изазова у развоју суперкондензатора, дефинисана су два правца у решавању описаног проблема. Један правац се односи на развој самоносивих (*енг.* self-standing) угљеничних нановлакна са оптималном комбинацијом микро/мезопора, а који могу да се директно користе као електроде без употребе било каквих адитива/везива, што је и њихова највећа предност. Предложена је метода процесирања која обухвата електропоређење одабраних полимерних прекурсора и накнадни термички третман. Припремљени су материјали који имају високу хемијску стабилност, изузетну електричну и топлотну проводљивост. Као други правац, предложена је модификована метода процесирања у којој су угљенична нановлакна основа спинелима на бази кобалта и мангана са израженим псеудокапацитивним или батеријским карактеристикама. Спинели са различитим фазним саставима су показали веома високе вредности капацитивности/капацитета, зависно од доминантног механизма у одговарајућем електролитском раствору.

У таквим новим композитним нановлакнима је остварен синергијски ефекат имајући у виду нижу електричну проводљивост спинела и краћи радни век у односу на угљенична нановлакна. Стога су резултати ове дисертације веома значајни за унапређење метода процесирања, што је значајно за даљи развој суперкондензатора, али и разумевање механизма складиштења електричне енергије код нових електроодних материјала.

### 3.2. Осврт на референтну и коришћену литературу

У току израде докторске дисертације кандидат је извршио детаљан преглед научне и стручне литературе у вези са темом истраживања. Цитирано је 218 референци, од којих су већина радови публиковани у водећим међународним часописима. Анализирани су радови из области технологија складиштења електричне енергије са фокусом на суперкондензаторе, угљеничних нановлакна, угљенично–спинелних композита са контролисаним саставом и морфологијом као и литература у којој су проучаване методе процесирање нановлакна са фокусом на електропреење. Прегледани су и цитирани радови и уџбеници посвећени физичко–хемијској карактеризацији материјала у којима су коришћене најсавременије технике карактеризације као што су технике XRD, HAADF STEM, EELS, EDS и XPS. Анализирањем наведене литературе, кандидат је стекао широк увид у проблематику овог рада чиме је постигао комплетан критички преглед процесирања, и карактеризације угљеничних и угљенично–спинелних нановлакна са могућношћу контролисања морфологије и кристалног састава материјала и њихове примене у уређајима за складиштење електричне енергије са фокусом на суперкондензаторе.

### 3.3. Опис и адекватност примењених научних метода

У току израде дисертације коришћене су савремене методе карактеризације процесираних материјала. Након процесирања методом термичке обраде полимерних/хибридних нановлакна, увид у њихову морфологију (облик и величину) нановлакна и нанокристала спинела, квалитативни састав и кристалну структуру добијен је применом SEM, STEM, HAADF–STEM, HRTEM, EDS, EELS и XPS техника. Величина кристалита спинелне фазе и параметри решетке су испитани рендгенском дифракцијом. Анализа порозности (површина и расподела пора) је извршена помоћу BET методе. Одређена су оксидациона стања кобалта и мангана путем XPS методе. Количина угљеника и спинела у укупној количини нановлакна добијена је TGA анализом. Процесирани материјали су коришћени као активни материјали у електродама у електрохемијским ћелијама са три и/или две електроде. Електроде су окарактерисане методама цикличне волтаметрије, галваностатског пуњења/пражњења и импедансним мерењима у базном електролиту. За конвенционална електрохемијска испитивања, претходно припремљена паста је пресована на носач од никлене пене који је имао улогу радне електроде, док су самоносиве електроде испитане у посебно направљеним Swagelok и „новчић“ ћелијама.

### 3.4. Применљивост остварених резултата

На основу добијених резултата у оквиру ове докторске дисертације може се закључити да је остварен значајан научни допринос дизајнирањем и добијањем угљеничних и угљенично–спинелних нановлакна. Циљ рада је био добијање нових електроодних материјала са контролисаном морфологијом и кристалном структуром и у дисертацији је приказана могућност потенцијалне примене у уређајима за складиштење електричне енергије. Угљенична и угљенично–спинелна нановлакна могу да се користе у кондензаторима са електричним двојним слојем и у кондензаторима са псеудокапацитивним/батеријским карактеристикама, респективно, са аспекта њихове високе капацитивности и стабилности при циклизирању. Овакав резултат не ограничава примену ових нових материјала у другим уређајима за складиштење електричне енергије, што говори о њиховој широкој примени.

### 3.5. Оцена достигнутих способности кандидата за самостални научни рад

Кандидат Даниел М. Мијаиловић, мастер инж. технологије, захваљујући континуираном истраживању у области складиштења електричне енергије током израде докторске дисертације показао је стручност и самосталност у процесирању материјала, припреми и извођењу електрохемијских експеримената и анализи добијених резултата, као и њиховом повезивању са резултатима карактеризације материјала различитим физичко-хемијским методама. Такође, показао је и способност за критичку анализу коришћене литературе. Поред тога, кроз научну посету Институту за хемију и технологију материјала Техничког универзитета у Грацу и обуку на тзв. *operando* мерењима (паралелна масена и електрохемијска карактеризација) различитих електродних материјала показао је жељу за усавршавањем и савладавањем нових и најсавременијих експерименталних техника. На основу тога, Комисија сматра да Кандидат поседује све квалитете неопходне за самосталан научно-истраживачки рад.

## **4. ОСТВАРЕНИ НАУЧНИ ДОПРИНОС**

### 4.1. Приказ остварених научних доприноса

Резултати истраживања у оквиру ове докторске дисертације су дали вишеструк научни допринос при чему се може издвојити следеће:

- усавршена метода процесирања порозних материјала који поседују (1) контролисану морфологију и кристалну структуру, (2) развијену порозну структуру, (3) оптималну расподелу пора, и (4) површинске функционалне групе које побољшавају капацитивне карактеристике;
- контролисано припремљена самоносива угљенична нановлакна високе порозности која имају потенцијал директног коришћења као електроде у кондензаторима са електричним двојним слојем;
- објашњен утицај параметара процесирања на структуру порозних материјала и успостављене корелације са електрохемијским својствима;
- примењена модификована метода процесирања за синтезу нових електродних материјала у форми угљенично-спинелних композитних нановлакна са контролисаном морфологијом и кристалном структуром спинела;
- демонстрирана специфична „језгро–омотач“ структура композитних нановлакна који је показао највећи потенцијал за потенцијалну примену у воденим електролитима;
- испитане порозне електроде у посебно конструисаним Swagelok ћелијама са симетричном конфигурацијом и приказано поређење са комерцијално доступним електродама.

### 4.2. Критичка анализа резултата истраживања

Резултати ове дисертације представљају значајан допринос истраживањима везаним за проналазак нових електродних материјала који могу да реше проблеме електрода које се користе у области складиштења електричне енергије, прецизније у суперкондензаторима. Циљ истраживања је био да се дизајнирају, процесирају и детаљно испитају нови материјали као електроде у кондензаторима са електричним двојним слојем и кондензаторима са батеријским карактеристикама. У том смеру су и процесирани порозна угљенична нановлакна и угљенично–спинелна композитна нановлакна контролисане морфологије методом електропоређења и накнадном термичком обраде. Резултати дисертације показали су значајно побољшање капацитивности са високим степеном стабилности при циклизирању ових електродних материјала у односу на комерцијалне активне угљенике. Поред тога, проучавање механизма нових електродних материјала у воденим електролитима допринело је и бољем разумевању процеса складиштења електричне енергије.

#### 4.3. Верификација научних доприноса

##### Категорија M21a (Рад у међународном часопису изузетне вредности)

1. Petit Y.K., Mourad E., Prehal C., Leypold C., Windischbacher A., **Mijailovic D.**, Slugovc C., Borisov S.M., Zojer E., Brutti S., Fontaine O., Freunberger S.A.: *Mechanism of mediated alkali peroxide oxidation and triplet versus singlet oxygen formation*, - Nature Chemistry, Vol 13, 2021, pp. 465-471; IF 24.274; ISSN: 1755-4349; doi: 10.1038/s41557-021-00643-z.
2. **Mijailović D.M.**, Radmilović V.V., Lačnjevac U.Č., Stojanović D.B., Jović V.D., Radmilović V.R., Uskoković P.S.: *Core-shell carbon fiber@Co<sub>1.5</sub>Mn<sub>1.5</sub>O<sub>4</sub> mesoporous spinel electrode for high performance symmetrical supercapacitors*, - Applied Surface Science, Vol 534, 2020, 147678, pp. 1-11; IF 6.707; ISSN: 0169-4332; doi: 10.1016/j.apsusc.2020.147678.

##### Категорија M21 (Рад у врхунском међународном часопису)

1. **Mijailović D.M.**, Vukčević M.M., Stević Z.M., Kalijadis A.M., Stojanović D.B., Panić V.V., Uskoković P.S.: *Supercapacitive Performances of Activated Highly Microporous Natural Carbon Macrofibers*, - Journal of The Electrochemical Society, Vol 164, 2017, pp. A1061-A1068; IF: 4.099; ISSN: 1945-7111; doi: 10.1149/2.0581706jes.
2. **Mijailović D.M.**, Radmilović V.V., Lačnjevac U.Č., Stojanović D.B., Bustillo K.C., Jović V.D., Radmilović V.R., Uskoković P.S.: *Tetragonal CoMn<sub>2</sub>O<sub>4</sub> nanocrystals on electrospun carbon fibers as high-performance battery-type supercapacitor electrode materials*, - Dalton Transactions, Vol 50, 2021, pp. 15669–15678; IF: 4.569; ISSN: 1477-9234; doi: 10.1039/D1DT02829D.

##### Категорија M32 (Предавање по позиву са међународног скупа штампано у изводу)

1. **Mijailović D.M.**, Lačnjevac U.Č., Jović V.D., Stojanović D.B., Radmilović V.V., Radmilović V.R., Uskoković P.S.: *Mesoporous electrodes based on carbon nanofibers and transition metal spinel oxides for energy storage applications*, - Contemporary batteries and supercapacitors, COIN 2022, Belgrade, Serbia, June 01-02, 2022, pp. 21; ISBN 978-86-82139-86-7.

##### Категорија M33 (Саопштење са међународног скупа штампано у целини)

1. **Mijailović D.M.**, Lačnjevac U.Č., Jović V.D., Stojanović D.B., Radmilović V.V., Radmilović V.R., Uskoković P.S.: *Synthesis and Supercapacitive Performances of Electrospun Carbon Nanofibers Decorated with Spinel Co<sub>1.5</sub>Mn<sub>1.5</sub>O<sub>4</sub> Nanocrystals*, - First YOUNg ResearcherS Conference, YOURS 2019, Belgrade, Serbia, March 26-27, 2019, The Book of Abstracts, pp. 10; ISBN 978-86-84231-49-1.
2. **Mijailović D.**, Stević Z., Panić V., Vukčević M., Stojanović D., Uskoković P.: *The capacitive performances of porous carbon electrodes investigated by novel system for electrochemical testing of supercapacitors*, - Proceedings of the Fourth International Conference on Renewable Electrical Power Sources, Belgrade, Serbia, October 17-18, 2016, pp. 467-472; ISBN 978-86-81505-80-9.
3. **Mijailović D.**, Stević M., Stević Z., Bondarenko O., *Computer Controlled System for Thermogravimetric Analysis*, - IEEE International Conference on Electronics and Information Technology (EIT'16), Odessa, Ukraine, May 23-27, 2016, pp. 17-20; ISBN 978-1-5090-2224-3.

Категорија М34 (Саопштење са међународног скупа штампано у изводу)

1. **Mijailović D.M.**, Radmilović V.V., Lačnjevac U.Č., Stojanović D.B., Jović V.D., Radmilović V.R., Uskoković P.S.: *Mesoporous Carbon Nanofibers and Spinel Oxide Nanocomposites for Energy Storage Applications*, - Second International Conference: "Electron Microscopy of Nanostructures", ELMINA 2022, Belgrade, Serbia, August 22-26, 2022, pp. 118; ISBN 978-86-7025-943-0.
2. **Mijailović D.M.**, Radmilović V.V., Lačnjevac U.Č., Stojanović D.B., Jović V.D., Radmilović V.R., Uskoković P.S.: *High-performance supercapacitors based on core-shell structured carbon fibers@spinel oxide composites*, - Twenty-first Annual Conference YUCOMAT 2019, Herceg Novi, Montenegro, September 2-6, 2019, The Book of Abstracts, pp. 127; ISBN 978-86-919111-4-0.
3. **Mijailović D.M.**, Lačnjevac U.Č., Radmilović V.V., Stojanović D.B., Radmilović V.R., Jović V.D., Uskoković P.S.: *Electrospun hybrids of carbon nanofibers with mixed metal oxide nanoparticles as high-performance battery-type supercapacitors*, - Seventeenth Young Researchers' Conference - Materials Science and Engineering, Belgrade, Serbia, December 5-7, 2018, The Book of Abstracts, pp. 60; ISBN 978-86-80321-34-9.
4. **Mijailović D.M.**, Lačnjevac U.Č., Radmilović V.V., Stojanović D.B., Radmilović V.R., Jović V.D., Uskoković P.S.: *Electrospun Hybrids of Carbon Nanofibers with Cobalt and Manganese Oxide Nanoparticles as High-Performance Electrodes for Supercapacitors*, - First International Conference: "Electron Microscopy of Nanostructures", ELMINA 2018, Belgrade, Serbia, August 27-29, 2018, pp. 87; ISBN 978-86-7025-785-6.
5. **Mijailović D.M.**, Radmilović V.V., Radmilović V.R., Stojanović D.B., Jović V.D., Lačnjevac U.Č., Uskoković P.S.: *Electrospun carbon nanofibers decorated with mixed Co and Mn oxide nanoparticles as high-performance hybrid electrodes for supercapacitors*, Second Electrospinning for Energy Conference, ELEN2018, Montpellier, France, 13-15 June 2018, pp. 38.
6. **Mijailović D.M.**, Radojević V.J., Stojanović D.B., Janačković Đ.T., Uskoković P.S.: *The fabrication of tubular spinel cobalt manganese oxide by single-spinneret electrospinning as a high-performance electrode for aqueous supercapacitors*, Nineteenth Annual Conference, YUCOMAT 2017, Herceg Novi, Montenegro, September 4-8, 2017, The Book of Abstracts, pp. 85; ISBN 978-86-919111-2-6

## 5. ЗАКЉУЧАК И ПРЕДЛОГ

На основу изнетих података, мишљење Комисије је да докторска дисертација кандидата Даниела М. Мијаиловић, мастер инж. технологије, под називом „Порозне електроде на бази угљеничних влакана и спинела прелазних метала за примену у складиштењу електричне енергије“ представља значајан и оригиналан научни допринос предметној области истраживања. Оригиналност докторске дисертације је потврђена објављеним радовима у часописима међународног значаја и саопштавањем резултата на међународним и националним конференцијама, као и провером оригиналности применом програма iThenticate.

Имајући у виду квалитет, обим и научни допринос постигнутих резултата, Комисија предлаже Наставно-научном већу Технолошко-металуршког факултета да се докторска дисертација под називом „Порозне електроде на бази угљеничних влакана и спинела прелазних метала за примену у складиштењу електричне енергије“ кандидата Даниела М. Мијаиловић, мастер инж. технологије, прихвати, изложи на увид јавности у законски предвиђеном року и упути на коначно усвајање Већу научних области техничких наука Универзитета у Београду, као и да након завршетка ове процедуре позове кандидата на усмену одбрану дисертације пред Комисијом у истом саставу.

Београд, 23.01.2023.

### ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ

.....  
др Петар С. Ускоковић, редовни професор,  
Универзитет у Београду, Технолошко-металуршки  
факултет

.....  
академик др Велимир Р. Радмиловић, научни саветник  
у пензији, Универзитет у Београду, Технолошко-  
металуршки факултет

.....  
др Душица Б. Стојановић, научни саветник,  
Универзитет у Београду, Технолошко–металуршки  
факултет

.....  
др Урош Ч. Лачњевац, научни саветник, Универзитет  
у Београду, Институт за мултидисциплинарна  
истраживања

.....  
др Вук В. Радмиловић, доцент, Универзитет у  
Београду, Технолошко–металуршки факултет