

## НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ

**Предмет:** Реферат о урађеној докторској дисертацији кандидата Иване Д. Николић

Одлуком бр. 409/22 од 14.03.2023. године, именовани смо за чланове Комисије за преглед, оцену и одбрану докторске дисертације кандидата Иване Д. Николић под насловом

**„Одређивање специфичне топлоте и специфичне електричне отпорности чврстих електропроводних материјала струјно импулсном методом у широком опсегу температура“**

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

Кандидат Ивана Д. Николић (р. Алексић) уписала је докторске студије школске 2009/2010.г. на Електротехничком факултету Универзитета у Београду, модул Наноелектроника и фотоника.

У току докторских студија положила је све испите са просечном оценом 10,00 и испунила све обавезе везане за студијски истраживачки рад предвиђене наставним планом и програмом.

10.03.2016. године пријавила је тему за израду докторске дисертације. 15.03.2016. године Комисија за студије трећег степена разматрала је предлог теме за израду докторске дисертације и предлог Комисије о оцени научне заснованости теме упутила Наставно – научно већу на усвајање. Наставно-научно веће именовало је Комисију за оцену научне заснованости теме докторске дисертације (Одлука бр. 5022/09-1 од 29.03.2016. године). За ментора је предложен др Слободан Петричевић, ванредни професор. 22.04.2016. године кандидат је полагао јавну усмену одбрану теме пред Комисијом у саставу:

1. др Пеђа Михаиловић, ванредни професор, Универзитет у Београду, Електротехнички факултет.
2. др Јован Елазар, ванредни професор, Државни универзитет у Новом Пазару,
3. др Зоран Радаковић редовни професор, Универзитет у Београду, Електротехнички факултет.
4. др Ковиљка Станковић, доцент, Универзитет у Београду, Електротехнички факултет.

Комисија је закључила да је на јавној усменој одбрани теме докторске дисертације кандидат добио оцену „задовољно“.

Наставно-научно веће усвојило је Извештај Комисије за оцену научне заснованости теме докторске дисертације (Одлука бр. 5022/09-2 од 21.06.2016. године).

Веће научних области техничких наука дало је сагласност на предлог теме докторске дисертације (број : 61206-3267/2-16 од 04.07.2016. године).

27.02.2023. године кандидат је предао докторску дисертацију на преглед и оцену.

07.03.2023. године Комисија за студије трећег степена потврдила је испуњеност потребних услова за подношење предлога Наставно-научном већу Електротехничког факултета за формирање Комисије за преглед и оцену докторске дисертације.

Наставно-научно веће Факултета именовало је Комисију за преглед и оцену докторске дисертације (број одлуке бр. 409/22 од 14.03.2023 године) у саставу:

1. др Слободан Петричевић, редовни професор, Универзитет у Београду, Електротехнички факултет
2. др Пеђа Михаиловић, редовни професор, Универзитет у Београду, Електротехнички факултет
3. др Ненад Милошевић, научни саветник, Институт за нуклеарне науке Винча

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.

Студенткиња је у току школске 2013/2014, 2017/2018, 2018/2019, 2020/2021, 2021/2022, године била у статусу мировања.

## 1.2. Научна област дисертације

Докторска дисертација припада широј научној области Електротехника и рачунарство и ужој научној области Физичка електроника (Електротехнички материјали и технологије) за коју је матичан Електротехнички факултет. За ментора докторске дисертације одређен је др Слободан Петричевић, редовни професор Електротехничког Факултета у Београду, на основу научних и стручних доприноса везаних за ужу научну област дисертације.

## 1.3. Биографски подаци о кандидату

Ивана Николић је 2003. године завршила Математичку гимназију у Београду. Исте године уписала је основне дипломске студије на Електротехничком факултету у Београду, смер Микроелектроника, оптоелектроника и ласерска техника. Дипломирала је 30.10.2007. са општим успехом 8,53 и оценом 10 на дипломском испиту, са темом „Карактеристике луминозности ТЦС модела повратних удара муња и громава“, док је мастер студије на истом факултету завршила 09.07.2009. са општим успехом 10,0 и оценом 10,0 на теми „Одређивање топлотне дифузивности цинка применом ласерске импулсне методе у широком температурном опсегу. Докторске студије је уписала у октобру 2009. године, смер Наноелектроника и фотоника. Јула 2016 године на Универзитету у Београду прихваћена је тема докторске дисертације под називом „Одређивање специфичне топлоте и специфичне електричне отпорности чврстих електропроводних материјала струјно-импулсном методом у широком опсегу температура“

Од 17.03.2008. године је запослена је у ИНН „Винча“, у Лабораторији за термотехнику и енергетику. Од 2015. до 2018. године ангажована је на међународном пројекту „Developing traceable capabilities in thermal metrology - Eura-Thermal“ у оквиру програма HORIZON 2020. Од 2018. до 2021. године ангажована је на међународном пројекту подржаном од стране EURAMET под скраћеним називом Ni-TRACE. Од 2015. године ради као овлашћени испитивач у акредитованој метролошкој лабораторији за температуру и термофизичке

особине материјала. Истраживачки рад Иване Николић је заснован на експерименталном одређивању термофизичких особина чврстих материјала, преношењу следивости и унапређењу експерименталних поставки Лабораторије за термотехнику и енергетику. Досадашњи резултати Иване Николић су: 4 рада у међународним научним часописима са импакт фактором, 3 рада са међународних конференција, 1 рад у научном часопису од националног значаја, 2 рада у зборницима скупова од националног значаја и 1 техничко решење. У оквиру израде дисертације објавила је један рад у међународном часопису са импакт фактором.

## **2. ОПИС ДИСЕРТАЦИЈЕ**

### 2.1. Садржај дисертације

Дисертација је написана на српском језику, ћириличним писмом. Укупна број страна дисертације почевши од увода укључујући библиографију и референце је 82. Дисертација је организована у десет поглавља са 49 слика, 5 табела и листом од 65 референци.

Текст дисертације подељен је на основна поглавља:

1. Увод
2. Опис особина и њихово одређивање (квази)стационарним методама
3. Струјно-импулсна метода
4. Нумеричка истраживања
5. Обрада експерименталних сигнала
6. Експериментална истраживања
7. Закључак и перспективе

Поред основних поглавља дисертација садржи насловну страну на српском и енглеском језику, страницу са подацима о ментору и члановима Комисије, сажетак са кључним речима и подацима о научној области на српском и енглеском језику, захвалницу. Поред наведеног на крају текста се налазе списак литературе, прилог, биографија аутора и обавезне изјаве (Изјава о ауторству, Изјава о истоветности штампане и електронске верзије докторског рада, Изјава о коришћењу).

### 2.2. Кратак приказ појединачних поглавља

Уводна глава говори о значају мерења термофизичких и термоелектричних особина материјала и важну улогу лабораторије у којој је дисертација урађена (Лабораторија за термофизичке особине материјала Института ВИНЧА) и методе мерења која је предмет дисертације како у националном тако и у међународном окружењу.

У другој глави описане су специфична топлота и специфична електрична отпорност као својства материјала која су од интереса за тезу и приказане су технике којима се оне могу мерити. Извршена је компаративна анализа техника са освртом на недостатке постојећих решења и предности које пружа струјно импулсна метода. Дата је класификација основних стационарних и динамичких калориметријских метода и опис мерних поставки и система рада. Анализиране су методе за одређивање специфичне електричне отпорности применом једносмерног извора напајања на средњим и високим температурама рада и дата је подела њихове примене у зависности од типа материјала, геометрије узорка и мерног опсега специфичне електричне отпорности поменутих метода.

Трећа глава описује струјно импулсну методу уводећи апроксимације дуге и танке жице и дугачке дебеле жице. Други сегмент ове главе детаљно разрађује еволуцију експерименталних поставки струјно импулсне методе. У трећем делу главе детаљно је

приказана експериментална поставка методе у Институту Винча која је предмет докторске дисертације са њеним техничким карактеристикама.

У четвртој глави описано је формирање два нумеричка модела за струјно импулсну методу за кратак и дебео узорак без држача и модела који је примењив за тренутну поставку у Институту Винча а који укључује и држач узорка. Извршени су симулације са новим моделом и добијене су процене температурне неуниформности по попречном пресеку и дуж узорка. Модели су верификовани симулацијама на узорку Волфрама и дата су поређења са експерименталним резултатима. Приказани су резултати расподела температура по централном попречном пресеку и на површини узорка до његовој дужини као и густине струје по централном попречном пресеку узорка. Добијени резултати за радијалну и аксијалну расподелу температура употребљени су за процену неодређености специфичне топлоте и специфичне електричне отпорности које су приказане графички.

У следећој, петој глави приказане су једначине и поступак за израчунавање вредности специфичне топлоте и специфичне електричне отпорности материјала и њихових несигурности из експерименталних сигнала струјно-импулсне методе. Уведена су два нова корекциона фактора и формиране су једначине потребне за прорачун буџета мерне несигурности.

Експериментални део докторске дисертације садржи и мерења на узорцима од волфрама, молибдена и легуре молибдена TZM у широком температурном опсегу и приказан је у шестој глави. Резултати су употребљени за међулабораторијска поређења из активности међународног пројекта којим су добијени узорци. Измерена термофизичка својства волфрама и молибдена употребљена су за развој и верификацију виртуалног 3D нумеричког модела струјно-импулсне методе. Глава садржи и пример буџета мерне несигурности специфичне топлоте и специфичне електричне отпорности за узорак волфрама.

Седма глава закључује тезу описујући њене доприносе и дајући преглед применљивости резултата тезе у инжењерској пракси.

### **3. ОЦЕНА ДИСЕРТАЦИЈЕ**

#### 3.1. Савременост и оригиналност

Током пролећа 2011.г. развијена је детаљна мапа развоја метрологије термофизичких својстава материјала на нивоу Европе унутар EURAMET техничког комитета са циљем развоја мерења и стандарда унутар ове дисциплине у наредних 15 година. Овим је на високом нивоу препозната потреба развоја ове дисциплине, потврђена њена актуелност и указано на њен шири друштвени значај. У том смислу ова докторска дисертација доприноси развоју специфичне мерне методе у оквиру ове дисциплине и прати актуелне циљеве препознате у споменутој мапи развоја.

Унапређење мерне методе и корекције добијених резултата циљ је развоја сваког експеримента. Оно што одликује оригиналност дисертације је препознавање тачака на којима има смисла инвестирати време и труд ради побољшања методе које изискује огроман рад и средства. У случају струјно импулсе поставке за мерење термофизичких својстава материјала, свака измена изискује велика средства за израду елемената поставке, а провера поставке пре завршних мерења значајна је ставка у цени. У оваквој ситуацији правилна идентификација места за поправку методе и проналажење начина да се формирањем модела уштеди време и велика средства јасно указују на оригиналан приступ решавању проблема. Специфична поставка у Лабораторија за термофизичке особине материјала Института ВИНЧА захтева формирање оригинал нумеричког модела без којег поправка у мерењу није могућа. Кандидаткиња је формирала и верификовала оригинал нумерички модел специфичан за ову поставку и приказала његову применљивост у пракси.

### 3.2. Осврт на референтну и коришћену литературу

Преглед литературе која је употребљена у докторату обухвата 65 референци, стручних и научних публикација из области метрологије и метода мерења термофизичких и термоелектричних особина материјала. Литература садржи и публикације резултата које је кандидат остварио током истраживачког рада на изради тезе.

### 3.3. Опис и адекватност примењених научних метода

Докторска дисертација Иване Николић разрађује проблем мерења фундаменталних својстава материјала у екстремним условима како за материјал који се тестира на термофизичка и термоелектрична својства тако и на експерименталну поставку. Метода која је предмет моделовања у дисертацији захтева веома сложено експериментално окружење које је такве природе да само мерење није довољно за извођење закључака већ је потребно разумевање физичких процеса у мерењу ради формирања модела. У том смислу кандидаткиња је препознала потенцијалне тачке за унапређење технике мерења и постизање бољих резултата и правилно је идентификовала начин и средства за постизање ових циљева. Ради анализе адекватности полазних претпоставки кандидаткиња је формирала и верификовала нумеричке моделе кратке и дебеле жице и модел који геометријски одговара експерименталној поставци. Ови модели укључују поред утицаја губитака топлоте зрачењем и ефекат провођења топлоте кондукцијом дуж узорка. Верификација модела потом је урађена експериментално, поређењем резултата симулације и мерења, који су показали применљивост модела који је развила кандидаткиња. Захваљујући правилно формираним и верификованим моделима, кандидаткиња је успела да унапреди процедуру мерења и формира буџет мерне несигурности. Модел је додатно проверен на узорцима волфрама, молибдена и легуре молибдена TZM у широком температурном опсегу од собне температуре до максималних 3300 °C, 2600 °C и 2400 °C за волфрам, молибден и TZM, респективно, чиме је процес верификације заокружен.

### 3.4. Применљивост остварених резултата

Метода која је описана у докторској дисертацији специфична је због способности да карактерише материјале при јако високим температурама и зато је од великог интереса за индустрију. Познавање термоелектричних и термофизичких особина материјала у условима високих температура од великог је значаја за војну и ваздухопловну индустрију као и за нуклеарну технику. Значај ових мерења препознат је 2015.г. када је Лабораторија у којој су извршена истраживања из области докторске дисертације препозната од стране Дирекције за мере и драгоцене метале као национална метролошка лабораторија у области термофизичких особина чврстих материјала, тј. као носилац националних еталона за специфичну топлоту и специфичну електричну проводност електропроводних материјала, топлотну проводност термоизолационих материјала, као и за топлотну дифузивност метала, легура, керамика и осталих чврстих материјала. Важност ових мерења на интернационалном нивоу препозната је кроз европски истраживачки пројекат Hi-TRACE, а у који су поред лабораторије били укључени и национални метролошки институти Француске (LNE), Немачке (PTB), Велике Британије (NPL) и Србије (VINS), чланица EURAMET-а, и других истраживачких института и лабораторија у саставу ARIANE Group, Француска, Комитета за атомску енергију и алтернативне енергије (CEA), Француска, Универзитета за примењене науке (FHWS), Немачка, Обједињеног истраживачког центра (JRC), Европска комисија, Института за експерименталну физику Техничког универзитета у Грацу (TU), Аустрија, Баварског истраживачког центра за примењену енергију (ZAE Bayern), Немачка и компаније NETZSCH, Немачка. Допринос кандидата је у унапређењу мерења и остварењу циљева овог пројекта.

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

Кандидат, мастер инжењер електротехнике и рачунарства Ивана Николић, показала је способност да реализује сложено експериментално мерење за индустрију важних термоелектричних особина материјала струјно импулсном методом. Мерна поставка у чијем формирању и унапређењу је кандидаткиња учествовала захтева дубоко разумевање физичких принципа мерења, способност за моделовање физичких појава које су саставни део методе и њихову симулацију. На указану потребу за унапређењем струјно импулсне методе кандидаткиња је самостално развила и верификовала нумерички модел чиме је показала интересовање за област тезе и иницијативу. Резултати модела преточени су у научне радове из области тезе чиме је кандидаткиња демонстрирала способност за самостална научна истраживања.

## **4. ОСТВАРЕНИ НАУЧНИ ДОПРИНОС**

### 4.1. Приказ остварених научних доприноса

Оригинални допринос дисертације кандидата Иване Николић се може сажети у следећем:

1. Коришћењем програмског пакета COMSOL® развијен је тродимензионални нумерички модел струјно-импулсне методе који подразумева произвољни пречник и дужину узорка и који одговара како општој, тако и специфичној експерименталној струјно-импулсној поставци Института ВИНЧА. Модел укључује губитке топлоте према околини зрачењем и пренос топлоте кроз узорак кондукцијом, што се занемарује приликом стандардне примене методе. Извршена је верификација модела коришћењем добијених експерименталних вредности на узорку волфрама.

2. Применом развијеног нумеричког модела је извршена детаљна анализа температурних неуниформности по обе осе узорка, радијалној и аксијалној, за различите димензије и материјале узорка и за различите брзине грејања узорка. Такође је разматран и утицај дубине урањања узорка у држаче на расподелу температуре. На основу ове анализе је извршена процена одговарајуће компоненте релативне неодређености специфичне топлоте и специфичне електричне отпорности и предложене су мере оптимизације експеримента.

3. На примеру материјала волфрама, процењена је вредност статистичке грешке специфичне топлоте у зависности од примењене дужине узорка. Узимајући у обзир све резултате анализе и приказана побољшања, формиран је одговарајући буџет мерне несигурности за специфичну топлоту и специфичну електричну отпорност.

4. Ради прецизније обраде експерименталних података уведена су два нова корекциона фактора која се односе на компензацију коначног времена одзива термопара и корекцију паразитног напона између интристично заварених водова термопара.

5. Применом побољшане струјно-импулсне методе и у оквиру европског истраживачког пројекта EMPIR-17IND11 извршена су експериментална истраживања термофизичких особина референтних материјала волфрама, молибдена и легуре молибдена TZM у широком температурном опсегу, тј. од собне температуре до максималних 3300 °C, 2600 °C и 2400 °C за узорке волфрама, молибдена и легуре молибдена TZM, респективно.

6. Показано је да апроксимација дугачке и танке жице оправдана за узорке од 200 mm, док се код узорака мањих дужина јављају температурне неуниформности услед кондукције топлоте која не може бити занемарена. У тим случајевима је неопходно спровести горе наведена нумеричка истраживања.

### 4.2. Критичка анализа резултата истраживања

Сагледавањем постављених циљева и добијених резултата, констатујемо да је кандидаткиња Ивана Николић успешно одговорила на задате проблеме истраживања ове докторске дисертације. Одређивање специфичне топлоте и специфичне електричне отпорности чврстих електропроводних материјала у широком опсегу температура је побољшана развојем и верификацијом два нова 3Д нумеричка модела струјно-импулсне поставке. Новоуведени нумерички модели за разлику од досадашње примене апроксимације дуге танке жице узимају у обзир поред ефекта губљења топлоте зрачењем и ефекат губљења топлоте кондукцијом, које се неминовно јавља на високим температурама рада. Детаљном анализом резултата нумеричких модела извршене су процене компонента релативне неодређености специфичне топлоте и специфичне електричне отпорности услед губитака топлоте кондукцијом и зрачењем, за различите материјале и димензије узорака и различите услове експерименталног рада. За референтни узорак волфрама процењена је вредност статистичке грешке специфичне топлоте у зависности од примењене дужине узорка. На основу добијених резултата извршена је оптимизација експерименталних параметра и приступљено је експерименталној фази истраживања за три различита референтна материјала. Побољшање добијених вредности специфичне топлоте и специфичне електричне отпорности применом струјно импулсне методе се огледа у предложеним параметрима оптимизације експеримента и увођењем два нова корекциона фактора за обраду експериментално добијених сигнала што је допринело формирању буџета мерне несигурности који одговара оптимизованим условима рада струјно импулсне методе ИНН Винча.

Приликом рада са индустријским материјалима који често нису оптималних димензија, допринос и значај развијених 3Д модела струјно импулсне методе се најбоље огледа у анализи утицаја неуниформних расподела температура на коначне вредности специфичне топлоте и специфичне електричне отпорности. Такође, допринос и значај остварених резултата дисертације огледа се са једне стране у успешно спроведеном међулабораторијском поређењу у оквиру међународног пројекта Hi-TRACE под окриљем EURAMET-а и са друге стране у објављеном научном раду категорије M20.

#### 4.3. Верификација научних доприноса

Резултат истраживања који је вршен у оквиру израде докторске дисертације представља следећи рад:

##### Категорија M23:

1. **Nikolić Ivana D.**, Milošević N. D., Petričević S. J., “Temperature Nonuniformity due to Heat Conduction and Radiation in the Pulse Calorimetry Technique”, *Thermal Science*, Vol. 26, No. 4 Part B, 2022, pp. 3619-3626, (IF 1.971) (0354-9836) (<https://www.doiserbia.nb.rs/Article.aspx?ID=0354-98362200037N#.ZBrQ1nbMKVI>)

Остали радови проистекли из рада на докторату:

##### Категорија M22:

1. N. D. Milošević, **I. D. Aleksić**, “Thermophysical properties of solid phase Ti-6Al-4V alloy in a wide temperature range”, *International Journal of Materials Research*, Vol. 103, No. 6, pp. 707-714, 2013. (IF 0,691) (2195-8556) (<https://doi.org/10.3139/146.110678>)

##### Категорија M23:

2. Nenad Milošević, **Ivana Nikolić**, “Thermophysical properties of solid phase ruthenium measured by the pulse calorimetry technique over a wide temperature range”, *International Journal of Materials Research*, Vol. 106, No. 4, 2015, pp. 361-367 (IF 0.681) (2195-8556) (<https://doi.org/10.3139/146.111192>)

Категорија М33:

1. N.D. Milošević, N.M. Stepanić, M.M. Babić, I.D. Nikolić, "Measurements of thermophysical properties of solids at the Institute VINČA", THERMOPHYSICS 2016: 21st International Meeting, AIP Conference Proceedings, Terchova, Slovakia, Vol. 1752, pp. 030002-1 030002-16, (ISBN: 978-0-7354-1410-5) (<https://doi.org/10.1063/1.4955230>)


## 5. ЗАКЉУЧАК И ПРЕДЛОГ

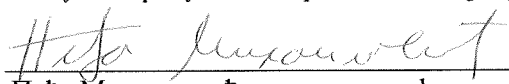
У докторској дисертацији под називом „Одређивање специфичне топлоте и специфичне електричне отпорности чврстих електропроводних материјала струјно импулсном методом у широком опсегу температура“ кандидата Иване Николић, комбинацијом експерименталног рада и развијеног теоријског модела је извршено унапређење струјно-импулсне методе за одређивање специфичне топлоте и специфичне електричне отпорности у широком температурном опсегу. Унапређење је нарочито важно за примену методе на високим температурама где су ефекти губитака топлоте значајни. Имајући у виду да је ова метода једна од ретких експерименталних техника која омогућава мерења на високим температурама, резултати ове дисертације омогућавају примену методе са већом поузданошћу и тачношћу што је веома значајно за истраживање нових материјала у свим областима индустрије, нарочито нуклеарне индустрије, аеронаутике и космонаутике. На основу приложених резултата, Комисија закључује да је тема дисертације од великог практичног значаја и да кандидат показује квалитете потребне за научно-истраживачки рад, што је доказано радовима објављеним у међународним часописима у којима је кандидат аутор или коаутор.


Комисија констатује да докторска дисертација кандидаткиње Иване Д. Николић испуњава све законске, формалне и суштинске услове и критеријуме који се примењују приликом вредновања докторских дисертација на Електротехничком факултету и Универзитету у Београду. Имајући у виду постигнуте резултате и научне доприносе, Комисије предлаже Наставно-научном већу Електротехничког факултета у Београду да се докторска дисертација под називом „Одређивање специфичне топлоте и специфичне електричне отпорности чврстих електропроводних материјала струјно импулсном методом у широком опсегу температура“ кандидата Иване Д. Николић прихвати, изложи на увид јавности и упуту на коначно усвајање Већу научних области техничких наука Универзитета у Београду као и да се кандидаткињи одобри јавна усмена одбрана.

У Београду,  
29.03.2023.г.

### ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ

  
др Слободан Петричевић, редовни професор  
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет

  
др Пеђа Михаиловић, редовни професор  
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет

  
др Ненад Милошевић, научни саветник  
Институт за нуклеарне науке Винча