

## NASTAVNO-NAUČNOM VEĆU FAKULTETA ZA FIZIČKU HEMIJU

Na redovnoj sednici Nastavno-naučnog veća Fakulteta za fizičku hemiju, održanoj **10.03.2016.** godine, imenovani smo u Komisiju za pregled i ocenu doktorske disertacije diplomiranog fizikohemičara Miloša Milovića, istraživača saradnika Instituta tehničkih nauka SANU, pod naslovom: „**Sinteza, strukturna i elektrohemijska svojstva  $\text{LiFePO}_4$  i  $\text{Li}_2\text{FeSiO}_4$  kao katodnih materijala za litijum-jonske baterije**“. Pošto smo pregledali doktorsku disertaciju podnosimo Nastavno-naučnom veću sledeći

### IZVEŠTAJ

#### A. Prikaz sadržaja disertacije

Doktorska disertacija kandidata Miloša Milovića napisana je na 102 strane kucanog teksta i sadrži sledeća poglavlja: *Uvod* (28 strana), *Cilj rada* (1 strana), *Materijali i metode* (10 strana), *Rezultati i diskusija* (43 strane), *Zaključak* (4 strane), *Literatura* od 188 referenci (16 strana). Kandidat je uz tekst disertacije priložio i spisak radova proisteklih iz doktorske disertacije (3 strane), Biografiju (1 strana) i dodatke propisane pravilima Univerziteta o podnošenju doktorskih teza na odobravanje (4 strane).

Rad sadrži ukupno 43 slika (12 slika iz postojeće literature, 31 slika predstavlja vlastite rezultate) i 18 tabela od čega je 1 tabela preuzeta iz dostupne naučne literature, a 17 je sadržano u poglavljima *Eksperimentalni deo* i *Rezultati i diskusija* i predstavlja naučni doprinos kandidata.

U poglavlju *Uvod* predstavljene su osnove na koje se ova disertacija oslanja; objašnjen je princip rada litijum-jonske ćelije, dat je pregled razvoja elektrodnih materijala koji se koriste u litijum-jonskim baterijama, opisana su osnovna elektrohemijska svojstva litijum gvožđe fosfata ( $\text{LiFePO}_4$ ) i litijum gvožđe silikata ( $\text{Li}_2\text{FeSiO}_4$ ) i definisani su njihovi svojstveni nedostaci u vidu ograničenih elektronsko-jonskih transportnih sposobnosti, koji proističu iz strukturnog uređenja rešetke olivina  $\text{LiFePO}_4$ , odnosno tetraedarskih polimornih struktura  $\text{Li}_2\text{FeSiO}_4$ ; dat je literarni pregled postupaka kojima se navedeni nedostaci ublažuju ili otklanjaju, tzv. „state of the art“ tehnologije kojom se dobijaju katodni materijali unapređenih provodnih svojstava i visoke gustine energije.

U poglavlju *Cilj rada* istaknuta je u kratkim crtama namera ove disertacije, a to je sinteza prahova  $\text{LiFePO}_4$  i  $\text{Li}_2\text{FeSiO}_4$  i ispitavanje njihovih strukturnih i elektrohemijskih svojstava. Tokom sinteze, prah aktivnog materijala je modifikovan i unapređen *in situ* dobijanjem kompozita aktivnog materijala i ugljenika, koji je nastao dekompozicijom odgovarajućeg organskog prekursora na visokoj temperaturi, a sa namerom da se ograniči rast zrna i poveća provodljivost; skraćanjem trajanja termičkog tretmana omogućeno je da se rast kristala dodatno ograniči. Osim toga, sintetisan je olivin koji je dopiran fluorom  $\text{F}^-$ , i ispitan je uticaj ugradnje fluora na strukturne i elektrohemijske karakteristike praha.

U poglavlju *Materijali i metode* detaljno su opisani postupci korišćeni za sintezu različitih uzoraka katodnih prahova: precipitacioni metod za sintezu čistog  $\text{LiFePO}_4$ , fluorom dopiranog  $\text{LiFePO}_4$  i kompozita fluorom dopiranog  $\text{LiFePO}_4/\text{C}$ , zatim reakcija u čvrstom stanju za sintezu čistog  $\text{Li}_2\text{FeSiO}_4$ , kao i originalni metod kratkog odgrevanja prekursora u celuloznoj, odnosno metilceluloznoj matrici za sintezu kompozita  $\text{LiFePO}_4/\text{C}$ , odnosno  $\text{Li}_2\text{FeSiO}_4/\text{C}$ . Osim toga, predstavljene su metode fizičkohemijske karakterizacije ispitivanih materijala koje obuhvataju rendgenostrukturnu analizu, termogravimetrijsku analizu, merenje raspodele veličine zrna, merenje specifične električne provodljivosti, elektronsku mikroskopiju, mesbauersku spektroskopiju i galvanostatsko testiranje.

U poglavlju *Rezultati i diskusija* uporedo su opisane i komentarisane karakteristike dobijenih prahova: čistog  $\text{LiFePO}_4$ , fluorom dopiranog  $\text{LiFePO}_4$  i kompozita fluorom dopiranog  $\text{LiFePO}_4/\text{C}$ , čistog  $\text{Li}_2\text{FeSiO}_4$ , kao i kompozita  $\text{Li}_2\text{FeSiO}_4/\text{C}$  i  $\text{LiFePO}_4/\text{C}$  dobijenih originalnom metodom brzog

odgrevanja; poglavlje je podeljeno na četiri potpoglavlja u skladu sa korišćenom metodom sinteze katodnog praha. Analiziran je uticaj različitih postupaka modifikacije praha: anjonsko dopiranje fluorom, pravljenje *in situ* kompozita sa ugljenikom, kontrola vremena odgrevanja, na strukturne i elektrohemijske karakteristike dobijenih prahova u odnosu na karakteristike sintetisanih čistih nemodifikovanih prahova.

U poglavlju *Zaključak* su sumirani najvažniji rezultati teze i izvedeni zaključci do kojih se došlo na osnovu rezultata iznetih u poglavlju *Rezultati i diskusija*. Doktorska disertacija se završava poglavljem *Literatura*, gde su navedene sve reference prema redosledu pojavljivanja u tekstu.

## B. Opis rezultata teze

U okviru ove doktorske disertacije sintetisani su prahovi litijum gvožđe(II)-fosfata ( $\text{LiFePO}_4$ ) i litijum gvožđe(II)-silikata ( $\text{Li}_2\text{FeSiO}_4$ ) i ispitivana su njihova strukturna i elektrohemijska svojstva.

Precipitacijom iz vodenog rastvora i naknadnim odgrevanjem na  $700^\circ\text{C}$  sintetisan je prah olivina  $\text{LiFePO}_4$ . Istom metodom, zamenom prekursora  $\text{LiNO}_3$  sa prekursorom  $\text{LiF}$  sintetisan je prah olivina  $\text{LiFePO}_4$  dopiranog fluorom. Na kraju, stearinska kiselina korišćena je kao izvor ugljenika, a precipitacijom u rastopu stearinske kiseline i naknadnim odgrevanjem na  $700^\circ\text{C}$  sintetisan je kompozit fluorom dopiranog olivina  $\text{LiFePO}_4$  sa ugljenikom. Utvrđeno je da se fluor ugrađuje u rešetku olivina u iznosu od oko 2-3 atom% na mestima kiseonika (čiji je jonski radijus blizak, mada nešto veći od jonskog radijusa fluora) i to isključivo na O2 poziciji što je energetski najpovoljnije rešenje od moguće tri kristalografske pozicije kiseonika. Kao posledica ugradnje fluora smanjuje se zapremina jedinične ćelije rešetke olivina; prisustvo fluora stabilise olivinsku strukturu što za posledicu ima smanjenu učestalost tzv. „antisite“ defekta, u kome litijum na M1 poziciji i gvožđe na M2 poziciji međusobno izmenjuju mesta, i povećanu kristaliničnost  $\text{LiFePO}_4$  faze. Utvrđeno je da se specifična električna provodljivost  $\text{LiFePO}_4$  povećava pet puta (oko pola reda veličine) u odnosu na čist  $\text{LiFePO}_4$ . Katodne performanse praha dopiranog fluorom značajno su unapređene: duži naponski platoi pri svim testiranim strujnim gustinama ukazuju na „dublju“ interkalaciju litijuma, a samim time i kapaciteti su veći (npr. pri brzini cikliranja od C/3 specifični kapacitet olivina dopiranog fluorom iznosi 140 u odnosu na 85 mAh/g izmerenim za čist olivin). Dekompozicijom stearinske kiseline formiran je ugljenik (5 tž%) koji *in situ* oblaže čestice fluorom dopiranog  $\text{LiFePO}_4$  ograničavajući kristalni rast i sprečavajući aglomeraciju čestica. Usled povećane provodljivosti i smanjene srednje veličine zrna, kompozit fluorom dopiranog  $\text{LiFePO}_4/\text{C}$  ostvaruje superiorne katodne performanse: 95% (162 mAh/g) teorijskog kapaciteta pri gustini struje od C/10, 82% (140 mAh/g) pri 1C, 74% (125 mAh/g) pri 2C, 59% (100 mAh/g) pri 5C, uz odličnu reverzibilnost tokom 150 testiranih ciklusa punjenja-pražnjenja.

Polazeći od prekursora smeštenog unutar celulozne matrice (nanoporozni kvantitativni filter papir), sintetisan je kompozit  $\text{LiFePO}_4/\text{C}$  postupkom naglog zagrevanja do  $700^\circ\text{C}$ , kratkim boravkom na toj temperaturi (5 min) i naglim hlađenjem – „kvenčovanjem“ – do sobne temperature. Metod brzog termičkog tretmana ograničava rast kristala olivin-fosfata, dok s druge strane štedi vreme i energiju. Na ovaj način dobijena je uređena  $\text{LiFePO}_4$  faza u nanokristalnom obliku (srednje veličine kristalita od 35 nm) uz prisustvo minimalne količine defekata („antisite“, 2 atom%) i amorfna faza negrafitnog ugljenika koji oblaže čestice  $\text{LiFePO}_4$ . Težinski udeo ugljenika u kompozitu iznosi znatnih 40%. Dobijeni kompozitni prah je elektrohemijski aktivan i stabilan tokom 150 testiranih ciklusa punjenja-pražnjenja; pri niskim gustinama struje ostvaruje visoku iskorišćenost aktivnog materijala od 97% (165 mAh/g) teorijskog kapaciteta pri C/10, dok pri većim gustinama: 1C, 5C, 10C daje redom 140, 120 i 110 mAh/g uz doprinos pseudokapacitivnosti koja potiče od velike količine ugljenika.

Reakcijom u čvrstom stanju sintetisan je  $\text{Li}_2\text{FeSiO}_4$  koji je kristalisao u  $P2_1/n$  prostornoj grupi (#14). Srednja veličina kristalita iznosi oko 100 nm. Kao i kod  $\text{LiFePO}_4$ , kristalna rešetka  $\text{Li}_2\text{FeSiO}_4$  podložna je nastanku defekta („antisite“) u kome litijum i gvožđe međusobno izmenjuju

mesta: utvrđeno je prisustvo gvožđa u iznosu od 5 atomskih procenata isključivo na Li2 kristalografskoj poziciji, od moguće dve, Li1 i Li2 tetraedarske pozicije, kao rezultat elektrostatičkog odbijanja među katjonima gvožđa. Izračunata je prostorna distribucija sume valenci veza litijuma u okviru  $P2_1/n$  rešetke  $\text{Li}_2\text{FeSiO}_4$ ; pod pretpostavkom da u kristalu  $\text{Li}_2\text{FeSiO}_4$  sve vrednosti valence oko 1 predstavljaju pozicije mogućeg nalaženja litijuma, izračunata je 3D mapa mogućih putanja litijumovih jona i utvrđeno da je transport litijuma u okviru  $P2_1/n$  strukture  $\text{Li}_2\text{FeSiO}_4$  dvodimenzion i da se odvija po ravnima (101). Usled niske sopstvene provodljivosti materijala, kao i usled nekontrolisanog rasta i aglomeracije čestica  $\text{Li}_2\text{FeSiO}_4$  dobijenih reakcijom u čvrstom stanju, ispitivani prah, iako elektrohemijski aktivan, potvrdio je slabe katodne performanse uz znatnu polarizaciju elektrohemijskog profila pri punjenju i pražnjenju. Dalje, nakon više uzastopnih ciklusa punjenja i pražnjenja, *ex situ* XR difrakcionim merenjem, zapažena je konverzija strukture tokom (de)interkalacije litijuma iz  $P2_1/n$  u neuređenu *Pmnb* (prostorna grupa #62) polimorfnu strukturu.

Metodom brzog termičkog tretmana (na sličan način kao pri sintezi kompozita  $\text{LiFePO}_4/\text{C}$ ), koji uključuje naglo zagrevanje do  $750^\circ\text{C}$ , kratak boravak na toj temperaturi i kvenčovanje nakon toga, sintetisan je kompozit  $\text{Li}_2\text{FeSiO}_4/\text{C}$ . U vodi rastvorna metilceluloza, umesto čiste celuloze, korišćena je kao izvor ugljenika, čime je raniji metod sinteze unapređen. Variranjem koncentracije metilceluloze u početnom rastvoru sintetisani su kompoziti sa različitim sadržajem ugljenika i ispitan je njegov uticaj na mikrostrukturne, provodne i elektrohemijske karakteristike kompozita. Svojsvo metilceluloze da gelira pri zagrevanju rastvora i da se reverzibilno rastvara pri hlađenju omogućilo je ravnomerno mešanje prekursorskih komponenti, njihovo ravnomerno dispergovanje i zarobljavanje unutar metilcelulozne matrice. Na taj način omogućena je kontrola rasta čestica  $\text{Li}_2\text{FeSiO}_4$  već u prvim koracima sinteze. Dobijeni nanokristalni  $\text{Li}_2\text{FeSiO}_4$  kristalisao je u 14. prostornoj grupi,  $P2_1/n$ . Sa porastom sadržaja ugljenika smanjuje se srednja veličina kristalita (od 44 do 15 nm, za 3 tž% i 14 tž%). Dalje, sa porastom sadržaja ugljenika smanjuje se srednja veličina čestica, a specifična električna provodljivost se povećava, što vodi većoj iskorišćenosti aktivnog materijala. U odnosu na čist  $\text{Li}_2\text{FeSiO}_4$ , katodne karakteristike kompozita  $\text{Li}_2\text{FeSiO}_4/\text{C}$  znatno su unapređene: stabilno cikliranje, duži naponski platoi i veći kapaciteti (praktično duplo, 55 i 110 mAh/g za čist  $\text{Li}_2\text{FeSiO}_4$  i  $\text{Li}_2\text{FeSiO}_4/\text{C}_{9\%}$ ); međutim, preveliki sadržaj ugljenika (>9%tž.) dovodi do saturacije katodnih performansi.

### C. Uporedna analiza rezultata teze sa rezultatima iz literature

U ovoj tezi ispitivana su dva katodna materijala, i to  $\text{LiFePO}_4$  i  $\text{Li}_2\text{FeSiO}_4$ . Potencijal prvoga leži u izuzetnoj stabilnosti a drugoga u visokoj energijskoj gustini, pri čemu i jedan i drugi imaju isti nedostatak – nisku elektronsku i jonsku provodnost. Pažnja istraživača širom sveta usmerena je da se ispita odakle potiču navedeni nedostaci i na koji način se oni mogu otkloniti. Poznati načini za to u literaturi su (i) pravljenje kompozita sa provodnim aditivima [**H.C. Shin, W.I. Cho, H. Jang, Electrochimica Acta 52 (2006) 1472, Z. Zheng, Y. Wang, A. Zhang, T. Zhang, F. Cheng, Z. Tao, J. Chen, J. Power Sources 198 (2012) 229**], (ii) smanjivanje veličine čestica [**M. Gaberscek, R. Dominko, J. Jamnik, Electrochem. Commun. 9 (2007) 2778, D. Rangappa, K.D. Murukanahally, T. Tomai, A. Unemoto, I. Honma, Nano Lett. 12 (2012) 1146**], kao i (iii) dopiranje jonima [**S.-Y. Chung, J.T. Bloking, Y.-M. Chiang, Nat. Mater. 1 (2002) 123, S. Zhang, C. Deng, B.L. Fu, S.Y. Yang, L. Ma, Electrochimica Acta 55 (2010) 8482**].

U smislu ekonomičnosti, celuloza, kao najrasprostranjeniji polimer u prirodi, vrlo je pogodna za dobijanje *in situ* kompozita sa ugljenikom, dok njen derivat – metilceluloza (metil etar celuloze) – nosi dodatnu pogodnost u vidu rastvorljivosti u vodi. Karbokismetil celuloza korišćena je kao izvor ugljenika za dobijanje  $\text{Li}_3\text{V}_2(\text{PO}_4)_3/\text{C}$  kompozita [**Zhang L-L, Peng G, Liang G et al, Electrochim Acta 90 (2013) 433**] ili  $\text{LiMnPO}_4/\text{C}$  hidrotermalno [**Kotobuki M, Mizuno Y, Munakata H, Kanamura K, Electrochemistry 79 (2011) 467**]. Oslanjajući se na ranija otkrića, ovom tezom predložena je nova primena celuloze ili celuloznih etara za dobijanje  $\text{LiFePO}_4$  ili

Li<sub>2</sub>FeSiO<sub>4</sub>: metodom kratkog odgrevanja u celuloznoj matrici, koja koristi efekat dobijanja sitnih čestica i istovremeno nanošenje elektroprovodnog sloja.

Dobijeni prahovi kompozita LiFePO<sub>4</sub>/C i Li<sub>2</sub>FeSiO<sub>4</sub>/C testirani su kao katode u litijumskoj ćeliji i ostvaruju izuzetne performanse. Tako prah LiFePO<sub>4</sub>/C daje kapacitet od oko 140 mAh/g u odnosu pri struji pražnjenja 1C u odnosu na odgovarajuće kapacitete iz literature od 123 mAh/g [Y. Long, Y. Shu, X. Ma, M. Ye, *Electrochimica Acta*. **117** (2014) 105–112] ili 150 mAh/g [W. Peng, L. Jiao, H. Gao, Z. Qi, Q. Wang, H. Du, et al., *J. Power Sources*. **196** (2011) 2841–2847]. Prah Li<sub>2</sub>FeSiO<sub>4</sub>/C ostvaruje pri C/10 oko 110 mAh/g prema 124 mAh/g [R. Dominko, *J. Power Sources* **184** (2008) 462–468] ili 100 mAh/g [R. Dominko, D.E. Conte, D. Hanzel, M. Gaberscek, J. Jamnik, *J. Power Sources* **178** (2008) 842–847].

Treći način poboljšanja provodljivosti, korišćen takodje i u ovoj tezi: dopiranje jonima, dobro je poznat iz tehnologije poluprovodnika [B.I. Shklovskii A.L. Efros, *Electronic Properties of Doped Semiconductors*, Springer-Verlag, New York, 1984.]. Iako oba ispitivana materijala spadaju u klasu poluprovodnika, prema dosadašnjim literaturnim podacima dopiranje nije dalo očekivane rezultate. Anjonsko dopiranje jonom fluora F<sup>-</sup> kao dopanta korišćeno je sa uspehom kod slojevitih i spinelnih oksida [G.G. Amatucci, N. Pereira, *J. Fluor. Chem.* **128** (2007) 243], mada u slučaju olivina postoje nesuglasice u pogledu mesta okupacije fluora; u tom pogledu, postoje dva predloga, (i) 3F<sup>-</sup> jona zamenjuju celu PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> grupu [X.Z. Liao, Y.S. He, Z.F. Ma, X.M. Zhang, L. Wang, *J. Power Sources* **174** (2007) 720; M. Pan, X. Lin, Z. Zhou, *J. Solid State Electrochem.* **16** (2011) 1615] i (ii) predlog koji kaže da F<sup>-</sup> joni mogu zauzimati samo kiseonične pozicije [F. Lu, Y. Zhou, J. Liu, Y. Pan, *Electrochim. Acta* **56** (2011) 8833; F. Pan, W. Wang, *J. Solid State Electrochem.* **16** (2011) 1423]. Do sada, dopiranje fluorom uvek je rađeno u prisustvu *in situ* formiranog ugljenika, međutim, pošto ugljenik može da maskira efekte koji potiču od fluora, u ovoj tezi ispitivan je i uticaj fluora na čist LiFePO<sub>4</sub>, bez ugljenika prisutnog u kompozitu, kako bi razdvojili efekte koji potiču od ugljenika od onih koji potiču isključivo od fluora. U okviru ove teze, difrakcijom x-raka i mesbauerskom spektroskopijom utvrđeno je da fluor preferentno zauzima O2 poziciju kiseonika povećavajući specifičnu provodljivost 5 puta (oko pola reda veličine) u odnosu na čist olivin.

Sintetisani kompozit fluorom dopiranog LiFePO<sub>4</sub>/C ostvaruje izuzetne performanse uporedive sa relevantnim podacima iz literature. Pri brzini od C/10, 1C, 2C, 5C ostvaruje redom kapacitet 162, 130, 125, 95 mAh/g u odnosu na 159, 140, 127, 110 mAh/g [M. Pan, X. Lin, Z. Zhou, *J. Solid State Electrochem.* **16** (2012) 1615–1621] ili 148, 122, 110, 98 mAh/g [F. Pan, W. Wang, *J. Solid State Electrochem.* **16** (2012) 1423–1427] dobijene znatno skupljom i sofisticiranijom metodom.

#### D. Naučni radovi i saopštenja iz oblasti teze

Iz oblasti teze Miloša Milovića publikovana su četiri rada od kojih su tri objavljena u međunarodnim časopisima izuzetnih vrednosti (M<sub>21a</sub>), a jedan u vrhunskom međunarodnom časopisu (M<sub>21</sub>), dva saopštenja sa međunarodnih naučnih skupova štampana u celini (M<sub>33</sub>) i osam saopštenja sa međunarodnih skupova koja su štampana u izvodu (M<sub>34</sub>):

*Rad u međunarodnom časopisu izuzetnih vrednosti (M21a)*

1. Miloš Milović, Dragana Jugović, Nikola Cvjetičanin, Dragan Uskoković, Aleksandar S. Milošević, Zoran S. Popović, Filip R. Vukajlović, Crystal structure analysis and first principle investigation of F doping in LiFePO<sub>4</sub>, *Journal of Power Sources* 241 (2013) 70-79, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jpowsour.2013.04.109>
2. Dragana Jugović, Miodrag Mitrić, Miloš Milović, Bojan Jokić, Marija Vukomanović, Danilo Suvorov, Dragan Uskoković, Properties of quenched LiFePO<sub>4</sub>/C powder obtained via cellulose matrix-assisted method, *Powder Technology* 246 (2013) 539-544, <http://dx.doi.org/10.1016/j.powtec.2013.06.021>

3. Miloš Milović, Dragana Jugović, Miodrag Mitrić, Robert Dominko, Ivana Stojković-Simatović, Bojan Jokić, Dragan Uskoković, The use of methylcellulose for the synthesis of  $\text{Li}_2\text{FeSiO}_4/\text{C}$  composites, *Cellulose* 23 (2016) 239-246, <http://dx.doi.org/10.1007/s10570-015-0806-9>

*Rad u vrhunskom međunarodnom časopisu (M21)*

1. Dragana Jugović, Miloš Milović, Valentin N. Ivanovski, Max Avdeev, Robert Dominko, Bojan Jokić, Dragan Uskoković, Structural study of monoclinic  $\text{Li}_2\text{FeSiO}_4$  by X-ray diffraction and Mössbauer spectroscopy, *Journal of Power Sources* 265 (2014) 75-80, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jpowsour.2014.04.12>

*Saopštenje sa međunarodnog skupa štampano u celini (M33)*

1. M. Milović, D. Jugović, M. Mitrić, B. Jokić, D. Uskoković, Synthesis and structural properties of F-doped  $\text{LiFePO}_4/\text{C}$  Composite, 11th International Conference on Fundamental and Applied Aspects of Physical Chemistry-Physical Chemistry 2012, Proceedings Volume I, p. 441-443, Belgrade, Serbia, 2012
2. M. Milović, D. Jugović, M. Mitrić, B. Jokić, D. Uskoković, The  $\text{Li}_2\text{FeSiO}_4/\text{C}$  composites obtained from cellulose gel, 12th International Conference on Fundamental and Applied Aspects of Physical Chemistry-Physical Chemistry 2014, Proceedings Volume II, p. 604-607, Belgrade, Serbia, 2014.

*Saopštenje sa međunarodnog skupa štampano u izvodu (M34)*

1. D. Jugović, M. Mitrić, M. Milović, B. Jokić, D. Uskoković, Synthesis and characterization of  $\text{LiFePO}_4/\text{C}$  composite obtained by cellulose template, Fourteenth Annual Conference-Yucomat 2012, Program and the Book of Abstracts, p. 76, Herceg Novi, Montenegro, 2012
2. M. Milović, D. Jugović, M. Mitrić, B. Jokić, D. Uskoković, Synthesis and characterization of  $\text{Li}_2\text{FeSiO}_4/\text{C}$  composite, Fourteenth Annual Conference-Yucomat 2012, Program and the Book of Abstracts, p. 77, Herceg Novi, Montenegro, 2012
3. M. Milović, D. Jugović, M. Mitrić, B. Jokić, M. Vukomanović, D. Uskoković, New facile synthesis route for obtaining phase pure  $\text{LiFePO}_4/\text{C}$  composite, The Eleventh Young Researchers' Conference Materials Science and Engineering, Program and the Book of Abstracts, p. 102, Belgrade, Serbia, 2012
4. D. Jugović, M. Mitrić, M. Milović, B. Jokić, D. Uskoković, Crystal structure refinement of  $\text{Li}_2\text{FeSiO}_4$  cathode material, Fifteenth Annual Conference-Yucomat 2013, Program and the Book of Abstracts, p.75, Herceg Novi, Montenegro, 2013
5. M. Milović, F.R. Vukajlović, D. Jugović, M. Mitrić B. Jokić, N. Cvjetičanin, A.S. Milošević, Z.S. Popović, D. Uskoković, Synthesis of F-doped  $\text{LiFePO}_4$  via precipitation method, Fifteenth Annual Conference-Yucomat 2013, Program and the Book of Abstracts, p.75, Herceg Novi, Montenegro, 2013
6. M. Milović, D. Jugović, M. Mitrić, B. Jokić, R. Dominko, D. Uskoković, Sol-gel synthesis of  $\text{Li}_2\text{FeSiO}_4/\text{C}$ , The Twelve Young Researchers' Conference Materials Science and Engineering, Program and the Book of Abstracts, Belgrade, Serbia, 2013
7. D. Jugović, M. Milović, M. Mitrić, V. N. Ivanovski, M. Avdeev, B. Jokić, R. Dominko, D. Uskoković,  $\text{Li}_2\text{FeSiO}_4$  cathode material: the structure and electrochemical performances, 16th Annual Conference-Yucomat 2014, Program and the Book of Abstracts, p.6, Herceg Novi, Montenegro, 2014
8. M. Milović, D. Jugović, M. Mitrić, N. Cvjetičanin, A. Mraković, M. Senna, D. Uskoković, Synthesis of  $\text{LiFePO}_4$  by mechanical stressing and thermal annealing, 16th Annual Conference-Yucomat 2014, Program and the Book of Abstracts, p.62, Herceg Novi, Montenegro, 2014

## E. Zaključak komisije

Na osnovu izloženog može se zaključiti da rezultati kandidata predstavljaju originalan i značajan naučni doprinos u istraživanju  $\text{LiFePO}_4$  i  $\text{Li}_2\text{FeSiO}_4$  za primenu kao katodnih materijala u litijum-jonskim baterijama. Delovi teze kandidata već su publikovani u vidu četiri rada objavljena u vrhunskim naučnim časopisima međunarodnog značaja ( $M_{21}$ ), dva saopštenja sa međunarodnih naučnih skupova štampana u celini ( $M_{33}$ ) i osam saopštenja sa međunarodnih naučnih skupova koja su štampana u izvodu ( $M_{34}$ ).

Na osnovu izloženog, Komisija predlaže Nastavno-naučnom veću Fakulteta za fizičku hemiju Univerziteta u Beogradu da rad Miloša Milovića pod naslovom „**Sinteza, strukturna i elektrohemijska svojstva  $\text{LiFePO}_4$  i  $\text{Li}_2\text{FeSiO}_4$  kao katodnih materijala za litijum-jonske baterije**“, prihvati kao disertaciju za sticanje naučnog stepena doktora fizičkohemijskih nauka i odobri njenu javnu odbranu.

Komisija:

---

**dr Ivana Stojković Simatović, docent**  
Univerzitet u Beogradu, Fakultet za fizičku hemiju

---

**dr Dragana Jugović, viši naučni saradnik**  
Institut tehničkih nauka SANU

---

**dr Nikola Cvjetičanin, redovni profesor**  
Univerzitet u Beogradu, Fakultet za fizičku hemiju

---

**dr Slavko Mentus, redovni profesor, redovni član SANU**  
Univerzitet u Beogradu, Fakultet za fizičku hemiju

---

**dr Miodrag Mitrić, naučni savetnik**  
Univerzitet u Beogradu, Institut za nuklearne nauke Vinča