

Универзитет у Београду  
Електротехнички факултет

## НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ

**Предмет:** Реферат о урађеној докторској дисертацији кандидата мр Горана Савића

Одлуком Наставно-научног већа Електротехничког факултета у Београду бр. 944/3 од 27.01.2017. године, именовани смо за чланове Комисије за преглед и оцену докторске дисертације кандидата мр Горана Савића, дипломираног инжењера електротехнике, под насловом

### **Хардверска реализација брзог декодера компримоване слике са минималним захтеваним ресурсима**

После прегледа достављене дисертације и других пратећих материјала, Комисија је сачинила следећи

## РЕФЕРАТ

### 1. УВОД

#### 1.1. Хронологија одобравања и израде дисертације

Кандидат мр Горан Савић је магистарске студије завршио на Електротехничком факултету Универзитета у Београду одбраном магистарске тезе 08.07.2009. године. Пријаву и образложење теме докторске дисертације под насловом “Хардверска реализација брзог декодера компримоване слике са минималним захтеваним ресурсима” поднео је 05.03.2015. године. На седници Комисије за студије трећег степена Електротехничког факултета Универзитета у Београду (у даљем тексту ЕТФ) одржаној 10.03.2015. године, размотрена је пријава теме за израду докторске дисертације и упућен је предлог Наставно-научном већу ЕТФ за именовање Комисије за оцену услова и прихватање теме докторске дисертације у саставу: др Јелена Поповић Божовић, доцент (ЕТФ), др Мирослав Лутовац, редовни професор (Технички факултет Универзитета Сингидунум) и др Ирени Рељин, редовни професор (ЕТФ), а за ментора дисертације предложен је др Милан Прокин, редовни професор (ЕТФ). Наставно-научно веће ЕТФ је

на седници број 784 одржаној 17.03.2015. године (датум одлуке 24.03.2015, број одлуке 944/1), прихватило предлог Комисије за студије трећег степена, уз проширење Комисије за оцену услова и прихватање теме докторске дисертације са следећим члановима: др Иван Поповић, доцент (ЕТФ) и др Владимир Рајовић, доцент (ЕТФ).

Дана 21.04.2015. одржана је јавна усмена одбрана теме докторске дисертације, коју је кандидат мр Горан Савић успешно одбранио пред комисијом за оцену услова и прихватање теме докторске дисертације. Комисија за оцену услова и прихватање теме докторске дисертације је поднела извештај Наставно-научном већу ЕТФ 28.04.2015. и предложила је да се кандидату мр Горану Савићу одобри израда докторске дисертације под насловом “Хардверска реализација брзог декодера компримоване слике са минималним захтеваним ресурсима” под руководством ментора др Милана Прокина, редовног професора (ЕТФ). Комисија за студије трећег степена ЕТФ је на седници одржаној 12.05.2015. размотрила поднети извештај Комисије за оцену услова и прихватање теме докторске дисертације, и упутила га је на усвајање Наставно-научном већу ЕТФ. Наставно-научно веће ЕТФ је усвојило предлог Комисије за оцену услова и прихватање теме докторске дисертације на седници број 787 одржаној 23.06.2015. Веће научних области техничких наука је на седници одржаној 06.07.2015. донело одлуку (датум одлуке 06.07.2015., број одлуке 61206-3020/2-15) да даје сагласност на предлог теме докторске дисертације мр Горана Савића под насловом “Хардверска реализација брзог декодера компримоване слике са минималним захтеваним ресурсима”.

Кандидат мр Горан Савић је 27.12.2016. поднео докторску дисертацију на преглед и оцену. На седници Комисије за студије трећег степена ЕТФ одржаној 10.01.2017. године донета је одлука да се Наставно-научном већу ЕТФ предложи формирање Комисије за преглед и оцену докторске дисертације у саставу: др Милан Прокин, редовни професор (ЕТФ), др Јелена Поповић Божовић, доцент (ЕТФ) и др Мирослав Лутовац, редовни професор (Технички факултет Универзитета Сингидунум). Наставно-научно веће ЕТФ је на седници број 809 одржаној 17.01.2017. године (датум одлуке 27.01.2017, број одлуке 944/3), прихватило предлог Комисије за студије трећег степена, уз проширење Комисије за преглед и оцену докторске дисертације са др Ирини Рељин, редовни професор (ЕТФ), др Иван Поповић, доцент (ЕТФ) и др Милан Поњавић, ванредни професор (ЕТФ).

## 1.2. Научна област дисертације

Научна област дисертације је Електротехника и рачунарство, а ужа научна област је Електроника. За ову ужу научну област матичан је Електротехнички факултет Универзитета у Београду. Дисертација је урађена под менторством др Милана Прокина, редовног професора ЕТФ. Ментор испуњава законске услове за ментора, бави се научним радом у ужој области Електроника, а професионално се бави развојем патентираних метода за компресију слике и видеа.

## 1.3. Биографски подаци о кандидату

Мр Горан Савић је рођен у Сарајеву 23.11.1977. Основну школу је завршио 1992. у Сарајеву, а гимназију 1996. године у Чачку. Електротехнички факултет Универзитета у

Београду је уписао 1996. године, где је на смеру за електронику дипломирао 2002. године са просечном оценом 9,64 (највишом у генерацији рачунајући све одсеке). Дипломски рад је одбранио на тему “Комуникација са електричним бројилом преко ИЦ порта по *CENELEC* стандарду”. Магистрирао је 2009. године на Електротехничком факултету Универзитета у Београду одбравши магистарску тезу под називом “Хардверска реализација брзог директног и инверзног филтра са минималним ресурсима”.

Радни однос на Катедри за електронику Електротехничког факултета Универзитета у Београду је засновао 19.05.2005. на одређено време у трајању од четири године, са пуним радним временом за обављање послова асистента-приправника. У звање асистента са пуним радним временом на Катедри за електронику је изабран 07.09.2009, а у исто звање је реизабран 22.01.2013. За време радног ангажмана је учествовао у извођењу рачунских и лабораторијских вежби из следећих предмета: Основи електронике (ОТ2ОЕ, ОС2ОЕ, ОФ2ОЕ, 13Е042ОЕЛ, 13Е042ОЕФ), Пројектовање интегрисаних кола (ТЕ4ПИК), Дигитални *VLSI* системи (ОЕ4ДВС), Основи електронике (СИ1ОЕ, 13С041ОЕ), Техничка документација (ОЕ4ТД), Увод у пројектовање интегрисаних кола (ОЕЗУПК), Увод у електронику (О01УЕ), Основи дигиталне електронике (ОС2ОДЕ, ОФ2ОДЕ, ОС3ОДЕ, ОТ3ОДЕ, 13Е042ОД), Линеарна електроника (ОЕ3ЛЕ), Основи електронике (ОЕ2ОЕ, 13Е042ОЕ) и Основи дигиталне електронике (СИ2ОДЕ, 13С042ОДЕ). Коаутор је приручника за лабораторијске вежбе: М. Прокин, Р. Ђурић, Ј. Вујасиновић, Г. Савић, “Основи електронике (сви одсеци осим одсека за електронику) – приручник за лабораторијске вежбе”, Академска мисао, Београд, 2006.

Кандидат је учествовао на следећим пројектима Министарства за просвету, науку и технолошки развој: “Хардверска, софтверска, телекомуникациона и енергетска оптимизација *IPTV* система” (научно-технолошки пројекат ТР32039, 2011-2017, 8 истраживач-месеци годишње) и “Развој соларних пуњача излазне снаге до 10W за пуњење акумулатора” (иновациони пројекат 2007-2010, 8 истраживач-месеци годишње). Учествовао је и на међународном *Tempus JEP* 17028-02 пројекту финансираном од стране Европске комисије (2005. и 2006. године).

Кандидат је аутор или коаутор три рада у истакнутим међународним часописима са импакт фактором са *SCI* листе, пет радова на међународним конференцијама и два рада у домаћим часописима из области докторске дисертације, као и два рада на међународним конференцијама изван области докторске дисертације.

## 2. ОПИС ДИСЕРТАЦИЈЕ

### 2.1. Садржај дисертације

Докторска дисертација садржи насловну страну, кратак резиме на српском и енглеском језику, садржај, седам поглавља, списак коришћене литературе и кратку биографију аутора. Прво поглавље представља увод у област компресије и декомпресије дигиталне слике, са посебним акцентом на део који се односи на реализацију декодера компримоване слике. У другом поглављу је представљена анализа рада и хардверска реализација ентропијског декодера и декодерског процењивача вероватноће. Треће

поглавље садржи анализу рада и хардверску реализацију деквантизатора. У четвртом поглављу је представљена анализа рада и хардверска реализација инверзног подопсежног трансформатора. Пето поглавље садржи опис хардверске реализације декодера за једну равну боју. У шестом поглављу је описана реализација брзог декодера за компримовану слику у боји. Седмо поглавље садржи закључак.

Дисертација садржи 132 стране, 49 слика, 17 табела и 95 референци.

## 2.2. Кратак приказ појединачних поглавља

У уводном поглављу је укратко описан систем за компресију и декомпресију дигиталне слике према постојећем стању технике укључујући и декодер као део система за декомпресију дигиталне слике. Потом су наведени основни недостаци појединих делова декодера за декомпресију дигиталне слике према постојећем стању технике уз кратки опис начина на који су ти недостаци отклоњени и начина на који су перформансе тих делова декодера унапређене у овој дисертацији.

У другом поглављу су описани ентропијски декодер и декодерски процењивач вероватноће. Најпре је описан алгоритам рада ентропијског декодера и декодерског процењивача вероватноће. Представљени су начини на које је умањена хардверска комплексност ових делова декодера у односу на реализације према постојећем стању технике, елиминацијом употребе делитеља и множача. Приказан је и поступак рада декодерског процењивача вероватноће заснован на једнопролазном алгоритму који омогућава уштеду меморијских ресурса. Такође, описан је и поступак израчунавања контекста одбирака декомпонованог сигнала, на основу суседних одбирака уз посебно третирање магнитуде и знака за ненулте одбирке и посебно третирање магнитуде за нулте одбирке, чиме је остварена додатна оптимизација утрошка меморијских и логичких ресурса. На крају је приказана и описана хардверска реализација ентропијског декодера и декодерског процењивача вероватноће.

Треће поглавље посвећено је хардверској реализацији деквантизатора унутар декодера компримоване слике. Показан је начин на који се редукује утрошак логичких ресурса помоћу избора основног корака деквантизације као целобројног умношка степена броја два. На крају је приказана и описана хардверска реализација деквантизатора.

У четвртом поглављу је представљена хардверска реализација инверзног подопсежног трансформатора који врши дводимензионалну инверзну  $5/3$  дискретну *wavelet* трансформацију (DWT). Најпре је описана временски нестационарна реализација једнодимензионалног инверзног DWT  $5/3$  филтра (који се користи као основни градивни блок дводимензионалне инверзне DWT  $5/3$  архитектуре), која користи најмањи број логичких елемената и најмањи број регистара, и при томе има најмању укупну дисипацију и омогућава рад на највећој радној фреквенцији у поређењу са било којом другом реализацијом познатом из литературе. Затим је презентована и хардверска реализација дводимензионалне инверзне DWT  $5/3$  архитектуре која користи 20% мање меморијских ресурса од најбоље до сада објављене реализације у литератури. На крају поглавља су дата и поређења резултата синтезе различитих реализација из литературе са реализацијом описаном у овој дисертацији.

У петом поглављу је описана хардверска реализација декодера за једну раван боје. Приказан је и начин на који су повезани, у претходним поглављима описани, блокови који сачињавају декодер за једну раван боје. На крају поглавља су презентоване перформансе и утрошак хардверских ресурса хардверске реализације декодера за једну раван боје.

Шесто поглавље доноси приказ реализације и имплементације брзог декодера за декомпресију слике у боји. Дат је и приказ комплетног система за декомпресију слике у боји који осим декодера обухвата и мрежни интерфејс ка персоналном рачунару, помоћу кога се задају параметри декодера и почетак процеса декомпресије, као и интерфејс ка монитору на којем се приказује декомпримована слика. На крају поглавља су презентоване перформансе и утрошак хардверских ресурса система за декомпресију слике у боји, као и кашњење које производи систем за компресију и декомпресију слике у боји.

У седмом поглављу је дат преглед научних доприноса које садржи ова дисертација, као и кратак опис праваца даљих истраживања.

### 3. ОЦЕНА ДИСЕРТАЦИЈЕ

#### 3.1. Савременост и оригиналност

У оквиру хардверске реализације брзог декодера компримоване слике са минималним захтеваним ресурсима, извршена је подела реализације, у складу са постојећим стањем технике, на три дела. Сваки од делова – модула је посебно теоријски анализиран и дизајниран са циљем унапређења перформанси у односу на реализације према постојећем стању технике. Приликом дизајнирања тежило се и успело да се смањи потребна количина меморије као критичног ресурса у хардверским реализацијама, уз истовремено смањење потребних логичких ресурса, што представља оригиналан и савремен приступ постизању смањене потрошње декодера.

Најзначајније карактеристике оригиналног реализованог решења у односу на постојеће реализације су:

- потребна количина меморије је мања од референтних реализација, што је обезбеђено новом реализацијом декодерског процењивача вероватноће и инверзног дводимензионалног подопсежног трансформатора;
- укупан утрошак логичких ресурса је смањен елиминацијом употребе делитеља и множача у реализацијама ентропијског декодера и декодерског процењивача вероватноће, и реализацијом инверзног дводимензионалног подопсежног трансформатора са мањим утрошком логичких ресурса у односу на постојеће реализације;
- с обзиром да је значајно смањена потребна количина меморије, нема потребе за коришћењем блокова, плочица или рамова, тако да не постоје блоковски артефакти; и
- умањено је кашњење које продукује декодер коришћењем нове реализације једнопролазног декодерског процењивача вероватноће и инверзног дводимензионалног подопсежног трансформатора.

### 3.2. Осврт на референтну и коришћену литературу

Кандидат је детаљно претражио одговарајућу литературу. У докторској дисертацији је прецизно навео 95 библиографских референци на радове који су у вези са темом дисертације. Литература садржи и најновије радове релевантне за тему дисертације, као и одговарајуће радове чији је аутор или коаутор кандидат.

### 3.3. Опис и адекватност примењених научних метода

Методологија истраживања у оквиру докторске дисертације састојала се у следећем:

- Детаљно је проучена литература у којој се разматра декомпресија дводимензионалних сигнала.
- Посебно су разматрана решења која врше декомпресију у програмабилним логичким колима и интегрисаним колима.
- Резултати објављени у доступној литератури су сумирани и систематизовани.
- Анализирани су квалитативни недостаци доступних метода, као и недостаци који онемогућавају њихову ефикасну имплементацију у програмабилним логичким колима.
- Развијена је метода за декомпресију пиксел по пиксел уместо линија по линија.
- Смањена је величина филтерске меморије за инверзну једнодимензионалну и дводимензионалну подопсежну трансформацију.
- Смањен је капацитет меморије за смештање информације о контексту.
- Експериментално је потврђена практична примена за декомпресију компримоване дигиталне слике.

### 3.4. Применљивост остварених резултата

Развијена оптимизована имплементација брзог декодера компримоване слике у програмабилном логичком колу остварује велику брзину декомпресије дводимензионалних сигнала, што је чини нарочито погодном за декомпресију компримоване слике у реалном времену. Дизајн омогућава декомпресију са или без губитака, захваљујући чему има широк спектар примене. Декомпресија без губитака се може примењивати у апликацијама које захтевају потпуну прецизност, као што је декомпресија медицинских и астрономских слика. Декомпресија са губицима се може примењивати за декомпресију компримованих слика у апликацијама које захтевају минимални пропусни опсег, као што су преузимање филмова и удаљени монитори. Веома смањени захтевани ресурси омогућавају примену у уређајима са екстремно малом потрошњом и малом ценом. Изузетно мало кашњење омогућава примену у војним и безбедносним системима.

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

Кандидат је у изради дисертације показао способност за самостални научни рад. Извршио је систематичну и критичку анализу постојећих решења, уз уочавање њихових недостатака. Развио је оригиналну оптимизовану имплементацију брзог декодера компримоване слике у програмабилном логичком колу која смањује све потребне ресурсе. Показао је да је имплементација практично применљива њеном употребом за декомпресију дигиталне слике. Резултате својих истраживања објавио је у међународним часописима са високим импакт факторима. Кандидат је приликом израде дисертације показао изузетну систематичност у раду, истрајност у решавању проблема у дизајну и креативност у развоју нових приступа оптимизацији.

## **4. ОСТВАРЕНИ НАУЧНИ ДОПРИНОС**

### 4.1. Приказ остварених научних доприноса

Научни доприноси ове дисертације обухватају:

- детаљан преглед и класификацију литературе из области компресије и декомпресије дигиталне слике;
- оптимизовану имплементацију новог брзог хардверског декодера компримоване слике у програмабилном логичком колу;
- подршку декомпресији дигиталне слике са и без губитака;
- смањење кашњења у поступку декомпресије;
- смањење употребљених меморијских ресурса;
- смањење употребљених логичких ресурса;
- нови проток података унутар модула декодера слике;
- оптимизацију ентропијског декодера за имплементацију у програмабилним логичким колима;
- оптимизацију израчунавања контекста и декодерског процењивача вероватноће симбола за имплементацију у програмабилним логичким колима;
- развој и оптимизацију временски нестационарних једнодимензионалних инверзних DWT 5/3 филтара за имплементацију у програмабилним логичким колима, који захтевају мањи утрошак логичких и меморијских ресурса, имају мању дисипацију и омогућавају рад на највећој радној учестаности у поређењу са осталим реализацијама из литературе;
- развој и оптимизацију дводимензионалне инверзне DWT 5/3 архитектуре са најмањим утрошком меморијских ресурса у односу на било коју другу архитектуру до сада објављену у литератури;
- дефинисање нових праваца истраживања у домену оптимизације декомпресије видеа.

#### 4.2. Критичка анализа резултата истраживања

Увидом у дисертацију, полазне хипотезе и циљеве истраживања, Комисија констатује да је кандидат успешно одговорио на постављене изазове, и да остварени резултати оправдавају почетна очекивања. Предложен је оригиналан приступ у оптимизацији имплементације брзог хардверског декодера компримоване слике у програмабилном логичком колу помоћу обраде пиксел по пиксел, уместо линија по линија, чиме је знатно умањен утрошак меморијских и логичких ресурса и додатно смањено кашњење у процесу декомпресије. Такође су оптимизовани сви делови декодера, као што су инверзни нестационарни филтри у дводимензионалном подопсежном трансформатору, архитектура дводимензионалног инверзног подопсежног трансформатора, израчунавање контекста, процењивач вероватноће симбола, ентропијски декодер и проток података између свих ових делова. Комплетан дизајн је реализован и успешно истестиран.

#### 4.3. Верификација научних доприноса

Из најуже области непосредно везане за докторску дисертацију, кандидат је аутор или коаутор три рада у истакнутим међународним часописима са импакт фактором (категорије М22), пет радова на међународним конференцијама (категорије М33) и два рада у домаћим часописима (категорије М52).

##### Категорија М22:

1. **Goran Savić**, Milan Prokin, Vladimir Rajović, Dragana Prokin, "High-Performance 1-D and 2-D Inverse DWT 5/3 Filter Architectures for Efficient Hardware Implementation," *Circuits, Systems & Signal Processing*, 2016. Online ISSN: 1531-5878. DOI: 10.1007/s00034-016-0477-2 (IF=1.178)
2. **Goran Savić**, Milan Prokin, Vladimir Rajović, Dragana Prokin, "Novel one-dimensional and two-dimensional forward discrete wavelet transform 5/3 filter architectures for efficient hardware implementation," *Journal of Real-Time Image Processing*, 2016. Online ISSN: 1861-8219. DOI: 10.1007/s11554-016-0656-1 (IF=1.564)
3. Vladimir Rajović, **Goran Savić**, Vladimir Čeperković, Milan Prokin, "Combined one-dimensional lowpass and highpass filters for subband transformer," *Electronics Letters*, vol. 49, no. 18, pp. 1150-1152, Aug. 2013. ISSN 0013-5194, (IF=1.038)

##### Категорија М33:

1. **Goran Savić**, Milan Prokin, Vladimir Rajović, Dragana Prokin, "Hardware Realization of Direct Subband Transformer with Minimum Used Resources," *Proceedings of 4th Mediterranean Conference on Embedded Computing MECO 2015*, Budva, Montenegro, 14-18 June 2015, pp. 220-223.



2. **Goran Savić**, Milan Prokin, Vladimir Rajović, Dragana Prokin, "Hardware Realization of Inverse Subband Transformer with Minimum Used Resources," *Proceedings of 4th Mediterranean Conference on Embedded Computing MECO 2015*, Budva, Montenegro, 14-18 June 2015, pp. 224-227.
3. Vladimir Rajović, **Goran Savić**, Milan Prokin, "Hardware Realization of Fast Image Encoder with Minimum Memory Size", *Proceedings of 22nd Telecommunications Forum (TELFOR) 2014*, Belgrade, Serbia, 25-27 Nov. 2014, pp. 717-724.
4. **Goran Savić**, Milan Prokin, Vladimir Rajović, Dragana Prokin, "Direktno filtriranje i dekompozicija slike sa minimalnim korišćenim resursima", *Proceedings of 22nd Telecommunications Forum (TELFOR) 2014*, Belgrade, Serbia, 25-27 Nov. 2014, pp. 725-728.
5. **Goran Savić**, Milan Prokin, Vladimir Rajović, Dragana Prokin, "Inverzno filtriranje i kompozicija slike sa minimalnim korišćenim resursima", *Proceedings of 22nd Telecommunications Forum (TELFOR) 2014*, 25-27 Nov. 2014, Belgrade, Serbia, pp. 729-732.

#### Категорија M52:

1. **Goran Savić**, Milan Prokin, Vladimir Rajović, Dragana Prokin, "Optimalna hardverska realizacija direktnog podopsežnog transformatora," *Tehnika*, vol. 64, no. 5, 2015, pp. 815-821, ISSN 0040-2176
2. **Goran Savić**, Milan Prokin, Vladimir Rajović, Dragana Prokin, "Optimal Hardware Realization of Direct Subband Transformer," *Technics, special edition*, 2015, pp. 83-89, ISSN 0040-2176

## 5. ЗАКЉУЧАК И ПРЕДЛОГ

У својој докторској дисертацији под називом "Хардверска реализација брзог декодера компримоване слике са минималним захтеваним ресурсима", кандидат мр Горан Савић је извршио детаљну анализу проблема декомпресије дигиталне слике, а затим предложио начине за отклањање ових проблема, за које је пројектовао и реализовао хардвер и експериментално доказао њихову применљивост.

Из области докторске дисертације, кандидат је објавио два рада као први аутор и један рад као други аутор у истакнутим међународним часописима са импакт фактором, четири рада као први аутор и један рад као други аутор на међународним конференцијама, и два рада као први аутор у домаћим часописима чиме је показао способност за самосталан научни рад и потврдио оригиналан, савремен и значајан научни допринос. Текст дисертације је одлично организован кроз поглавља и одељке. Циљеви дисертације су јасно формулисани, а резултати истраживања систематски изложени и упоређени са постојећим стањем технике и референцама, тако да се научни доприноси могу недвосмислено утврдити.

Комисија констатује да дисертација садржи оригиналне научне доприносе, испуњава све законске, формалне и суштинске услове, као и све критеријуме који се уобичајено примењују приликом вредновања докторских дисертација на Електротехничком факултету Универзитета у Београду. Комисија са задовољством предлаже Наставно-научном већу Електротехничког факултета у Београду да прихвати овај Извештај и да га упути Већу научних области техничких наука Универзитета у Београду на усвајање и давање одобрења кандидату да приступи усменој одбрани.

У Београду, 01.03.2017. године.

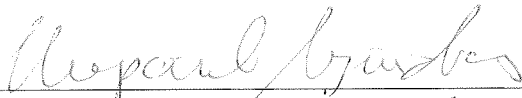
#### ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ



др Милан Прокин, редовни професор  
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет



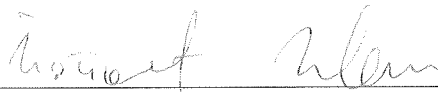
др Јелена Поповић Божовић, доцент  
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет



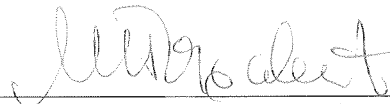
др Мирослав Лутовац, редовни професор  
Универзитет Сингидунум – Технички факултет



др Ирине Рељин, редовни професор  
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет



др Иван Поповић, доцент  
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет



др Милан Поњавић, ванредни професор  
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет