

НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ

Предмет: Извештај о урађеној докторској дисертацији кандидата Ненада Белчевића

Одлуком бр. 2040/30 од 05.11.2024. године, именовани смо за чланове Комисије за оцену дисертације кандидата Ненада Белчевића под насловом

Детекција пролазних кварова на надземним водовима у условима засићења струјног трансформатора

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

ИЗВЕШТАЈ

1. УВОД

1.1. Хронологија одобравања и израде дисертације

Кандидат Ненад Белчевић је 30.03.2023. године пријавио тему за израду докторске дисертације под називом „Детекција пролазних кварова на надземним водовима у условима засићења струјног трансформатора“.

Комисија за студије трећег степена је 04.04.2023. године разматрала предлог теме за израду докторске дисертације и предлог Комисије о оцени подобности теме и кандидата упутила Наставно-научном већу Електротехничког факултета.

Наставно-научно веће Електротехничког факултета Универзитета у Београду је, на 885. седници одржаној 11.04.2023. године, именovalo Комисију за оцену научне заснованости теме (одлука бр. 551/24 од 24.04.2023. године), у саставу:

1. др Јелисавета Крстивојевић, доцент, Универзитет у Београду – Електротехнички факултет
2. др Миодраг Форцан, доцент, Универзитет у Источном Сарајеву, Електротехнички факултет
3. др Лазар Сарановац, редовни професор, Универзитет у Београду – Електротехнички факултет
4. др Јован Микуловић, редовни професор, Универзитет у Београду – Електротехнички факултет
5. др Томислав Рајић, доцент, Универзитет у Београду – Електротехнички факултет

За ментора је предложен др Зоран Стојановић, редовни професор, Универзитет у Београду - Електротехнички факултет.

Јавна усмена одбрана теме докторске дисертације је одржана дана 24.04.2023. године. На одбрани су били присутни сви чланови Комисије за оцену научне заснованости теме докторске дисертације. Комисија је оценила усмену одбрану као успешну (оцена „задовољио“).

Наставно-научно веће Електротехничког факултета усвојило је извештај Комисије о прихватању теме докторске дисертације (одлука број 883/31 од 13.06.2023. године). За ментора дисертације, именован је др Зоран Стојановић, редовни професор. Веће научних области техничких наука Универзитета у Београду дало је сагласност на предлог теме докторске дисертације (решење број 61206-2512/2-23 од 10.07.2023. године).

Кандидат је 22.10.2024. године предао докторску дисертацију на преглед и оцену. Комисија за студије трећег степена потврдила је испуњеност потребних услова за предају дисертације на преглед и оцену (30.10.2024. године). Наставно-научно веће Електротехничког факултета именовало је Комисију за преглед и оцену докторске дисертације, под називом „Детекција пролазних кварова на надземним водовима у условима засићења струјног трансформатора“ (одлука 2040/30 бр. од 05.11.2024. године), у следећем саставу:

1. др Јелисавета Крстивојевић, доцент, Универзитет у Београду – Електротехнички факултет
2. др Јован Микуловић, редовни професор, Универзитет у Београду – Електротехнички факултет
3. др Миодраг Форцан, доцент, Универзитет у Источном Сарајеву, Електротехнички факултет
4. др Томислав Рајић, доцент, Универзитет у Београду – Електротехнички факултет
5. др Лазар Сарановац, редовни професор, Универзитет у Београду – Електротехнички факултет

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

1.2. Научна област дисертације

Докторска дисертација Ненада Белчевића под насловом „Детекција пролазних кварова на надземним водовима у условима засићења струјног трансформатора“ припада научној области Електротехника и рачунарство, ужој научној области Електроенергетски системи, за коју је матичан Електротехнички факултет Универзитета у Београду.

Ментор докторске дисертације је др Зоран Стојановић, редовни професор Електротехничког факултета Универзитета у Београду. Професор др Зоран Стојановић се дуго година бави научноистраживачким радом у областима релејне заштите постројења и мрежа, што је потврђено релевантним радовима који су наведени приликом пријаве теме докторске дисертације кандидата.

1.3. Биографски подаци о кандидату

Ненад Белчевић, рођен је 13.6.1992. године у Краљеву, где је завршио основну школу и гимназију. Уписао је Електротехнички факултет у Београду 2011. године. У току основних студија на Одсеку за енергетику, смер Електроенергетски системи, остварио је просечну оцену 9.15. Дипломирао је у септембру 2015. године. Мастер студије је уписао 2015. године на Електротехничком факултету, смер за Електроенергетске мреже и системе. Диплому мастер инжењера електротехнике и рачунарства стекао је у августу 2016. године. Мастер студије је завршио са просечном оценом 9.83. Завршни мастер рад под називом “Алгоритам за детекцију кварова са електричним луком на надземним водовима”, одбранио је са просечном оценом 10. Докторске студије на Електротехничком факултету уписао је 2016. године.

Радно искуство започео је у Електротехничком институту Никола Тесла, где је радио у периоду од 2016. до 2018. године у сектору за анализу електроенергетских система. У периоду од 2018. до 2020. године радио је у компанији *Energy Saving Group*, где је учествовао у развоју пројеката обновљивих извора енергије. Након 2020. године поново је ангажован на пословима израде студија за анализу електроенергетских система, у компанијама *WSP* и *Go2Power*. У свом професионалном раду бави се првенствено израдом студија координације релејне заштите, али и других студија из области анализе електроенергетских система.

Аутор је више радова публикованих у часописима са SCI листе, зборницима међународних, регионалних и домаћих конференција.

Област његовог интересовања су: релејна заштита, анализа електроенергетских система и разводна постројења.

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.

2. ОПИС ДИСЕРТАЦИЈЕ

2.1. Садржај дисертације

Докторска дисертација под насловом „Детекција пролазних кварова на надземним водовима у условима zasiћења струјног трансформатора“ је у потпуности усклађена са Упутством о облику и садржају докторске дисертације која се брани на Универзитету у Београду. Докторска дисертација је написана на српском језику, латиничним писмом, на 143 стране. Организована је у 9 поглавља, има 161 слику, 14 табела и листу од 65 референци. Наслови поглавља су:

1. Увод,
2. Алгоритми за детекцију zasiћења струјног трансформатора,
3. Алгоритми за компензацију zasiћења струјног трансформатора,
4. Алгоритми за детекцију електричног лука на надземним водовима,
5. Предложени алгоритам за детекцију и компензацију zasiћења струјног трансформатора,
6. Предложени алгоритам за детекцију електричног лука на надземним водовима,
7. Тестирање алгоритма за компензацију zasiћења струјног трансформатора на снимцима квара,
8. Тестирање алгоритма за детекцију електричног лука на снимцима квара,
9. Закључак.

2.2. Кратак приказ појединачних поглавља

У првом поглављу дата су уводна разматрања и истакнути су основни циљеви истраживања докторске дисертације. Сагледан је принцип рада традиционалног система аутоматског поновног укључења и истакнут је његов основни недостатак који се огледа у чињеници да његова примена доводи до непотребног напрезања опреме у случају трајног квара. Изложен је основни принцип рада паметних система аутоматског поновног укључења који се заснива на детекцији електричног лука у циљу идентификације природе квара. Указано је на немогућност примене паметних система аутоматског поновног укључења у условима zasiћења струјног трансформатора.

Друго поглавље обухвата преглед научне литературе из области детекције zasiћења струјног трансформатора. Сагледан је принцип рада различитих алгоритама, извршена је њихова класификација и указано је на основне предности и недостатке.

Треће поглавље представља преглед релевантних научних радова публикованих на тему компензације засићења струјног трансформатора. Посебна пажња посвећена је алгоритмима који се базирају на примени еквивалентне шеме струјног трансформатора. Указано је на чињеницу да су поједини алгоритми из ове области осетљиви на присуство реманентног флукса у језгру струјног трансформатора или на прецизност естимације иницијалног флукса, тј. флукса у тренутку настанка засићења струјног трансформатора.

Четврто поглавље представља анализу алгоритама публикованих у научној литератури из области детекције електричног лука на надземним водовима. Алгоритми су класификовани према домену у коме су реализовани (фазорски домен и временски домен). Указано је на чињеницу да без обзира у ком су домену алгоритми развијени, они се не могу применити у условима засићења струјног трансформатора.

У петом поглављу изложен је нови алгоритам за детекцију и компензацију засићења струјног трансформатора. Основна предност изложеног алгоритма огледа се у његовој неосетљивости на присуство реманентног флукса у језгру струјног трансформатора. Такође, алгоритам не захтева естимацију флукса у тренутку настанка засићења струјног трансформатора, што се позитивно одражава на робусност алгоритма. Пето поглавље садржи и приказ модела формираног у MATLAB/Simulink програмском пакету који је коришћен за тестирање алгоритама развијених у оквиру ове докторске дисертације. Посебан део петог поглавља представља тестирање предложеног алгоритма и анализа могућности његове примене заједно са алгоритмом за детекцију електричног лука, а у циљу идентификације природе квара у условима засићења струјног трансформатора.

У шестом поглављу предложен је нови алгоритам за детекцију електричног лука коришћењем искључиво напонских сигнала. Алгоритам се заснива на обради сигнала који се добија као разлика напона на месту квара и његовог основног хармоника. Посебан део овог поглавља представља анализа утицаја локације квара, вредности напона електричног лука, тренутка настанка квара, отпорности распростирања уземљивачког система стуба, импедансе мреже, таласног облика електричног лука на рад алгоритма, као и анализа рада алгоритма у случају међуфазног квара.

Седмо поглавље обухвата тестирање алгоритма за детекцију и компензацију засићења струјног трансформатора на снимцима квара преузетим са релеја у погону. Приказано је и испитивање реалног струјног трансформатора које је спроведено коришћењем опреме реномираног произвођача.

У осмом поглављу приказано је тестирање алгоритма за детекцију електричног лука које је извршено коришћењем сигнала прикупљених са релеја који се налазе у погону, чиме је овај алгоритам верификован и при кваровима у реалној мрежи.

Коначно, у деветом поглављу су сумирани основни закључци предметне докторске дисертације и наглашени њени главни доприноси и могућности примене у пракси.

3. ОЦЕНА ДИСЕРТАЦИЈЕ

3.1. Савременост и оригиналност

На основу прегледане докторске дисертације Комисија оцењује да дисертација обрађује врло актуелну проблематику из области релејне заштите електроенергетских система.

Највећи број кварова на надземним водовима је пролазног карактера. Основна карактеристика пролазног квара јесте појава електричног лука који се може елиминисати краткотрајним искључењем вода. Након поновног укључења надземног вода, лук се више не јавља и вод може наставити са нормалним радом. Захваљујући томе, у пракси се примењује систем аутоматског поновног укључења који иницира поновно укључење вода након унапред дефинисане безнапонске паузе.

Основни недостатак традиционалног система аутоматског поновног укључења представља чињеница да систем улази у поновно укључење без обзира на природу квара. Имајући у виду да су кварови на надземним водовима најчешће пролазног карактера, овакав приступ у највећем броју случајева доводи до жељеног ефекта, односно до елиминације квара. Међутим, у случају трајног квара, систем аутоматског поновног укључења доводи до поновног укључења на квар, услед чега се опрема излаже непотребном стресу и напрезању.

Основна идеја паметног система аутоматског поновног укључења јесте да се на основу напонских и струјних сигнала на почетку вода идентификује присуство лука на месту квара и на основу тога одлучи о природи квара.

Чињеница да у одређеним околностима током квара може доћи до засићења струјног трансформатора, отежава примену паметног система аутоматског поновног укључења. Улазак у засићење доводи до наглог пораста струје магнетног струјног трансформатора, што изазива значајну разлику између таласних облика струје примара и секундара. Наиме, струја секундара постаје деформисана и не може се употребити за детекцију електричног лука.

Проблему реализације паметног система аутоматског поновног укључења који се може применити и у условима засићења струјног трансформатора, у предметној дисертацији приступљено је на два начина. Први приступ подразумева примену алгоритма за детекцију и компензацију засићења струјног трансформатора. Примена овог алгоритма омогућава превазилажење проблема у раду постојећих алгоритама за детекцију електричног лука изазваних засићењем струјних трансформатора. Други приступ подразумева примену алгоритма за детекцију електричног лука, који користи искључиво напонске сигнале, услед чега је алгоритам неосетљив на засићење струјног трансформатора.

Алгоритам представљен у предметној докторској дисертацији врши компензацију засићења струјног трансформатора обрадом разлике вредности струје квара у два суседна тренутка одабирања, уместо њихових појединачних вредности. Оваквим приступом постигнута је реконструкција фазора примарне струје без обзира на присуство реманентног флукса у језгру струјног трансформатора. Такође, поменути приступ обезбеђује филтрирање једносмерне компоненте струје квара. Додатна предност развијеног алгоритма представља чињеница да његова примена омогућава реконструкцију не само основног хармоника струје квара, већ и виших хармоничних компоненти. Захваљујући томе, алгоритам се може применити у комбинацији са алгоритмом за детекцију електричног лука на надземним водовима у циљу идентификације природе квара чак и у условима засићења струјног трансформатора.

Други алгоритам представљен у предметној докторској дисертацији за детекцију електричног лука користи искључиво напонске сигнале. На тај начин елиминисан је негативан утицај засићења струјног трансформатора на детекцију електричног лука, односно добијен је алгоритам неосетљив на засићење струјног трансформатора. Алгоритам се заснива на обради сигнала који се добија као разлика напона на месту релеја и његовог основног хармоника. У условима пролазног квара, односно квара са електричним луком, поменути сигнал управо потиче од електричног лука и захваљујући томе има специфичне карактеристике које омогућавају идентификацију природе квара. Његовом обрадом естимира се напон електричног лука на месту квара. Алгоритам захтева познавање сигнала са једног краја штићеног вода што олакшава његову имплементацију.

3.2. Осврт на референтну и коришћену литературу

Током израде докторске дисертације, кандидат је детаљно истражио релевантну литературу из научне области којом се бави дисертација. Литература коришћена у дисертацији садржи најновије радове релевантне за проблематику дисертације, као и одговарајуће књиге. Литература наведена у дисертацији броји 65 библиографских референци. Број библиографских референци наведених на крају дисертације указује на кандидатов широк и темељан увид у резултате досадашњих истраживања у предметној научној области.

3.3. Опис и адекватност примењених научних метода

Методологија истраживања у оквиру докторске дисертације обухватила је фазе наведене у наставку:

- Упознавање са принципима рада традиционалног система аутоматског поновног укључења.
- Преглед постојеће и издвајање релевантне литературе у вези са детекцијом засићења струјног трансформатора, компензацијом засићења струјног трансформатора и детекцијом електричног лука на надземним водовима.
- Процена тренутног стања истраживања, идентификација отворених проблема и постављање хипотеза.
- Сагледавање проблема са којима се сусрећу алгоритми за компензацију засићења струјног трансформатора: осетљивост на присуство релантног флукса у језгру струјног трансформатора, потреба за естимацијом флукса у тренутку настанка засићења струјног трансформатора и немогућност реконструкције виших хармоничних компоненти струје квара.
- Сагледавање проблема са којим се сусрећу алгоритми за детекцију електричног лука на надземним водовима, који се огледа у немогућности детекције електричног лука у условима засићења струјног трансформатора.
- Развој новог алгоритма за детекцију и компензацију засићења струјног трансформатора.
- Развој новог алгоритма за детекцију електричног лука на надземним водовима који се заснива на коришћењу искључиво напонских сигнала.
- Формирање модела за потребе симулације, тестирања и верификације рада нових алгоритама, применом програмског пакета MATLAB.
- Верификација рада нових алгоритама на основу преузетих записа релеја који се налазе у погону.

Примењена методологија у потпуности одговара проблемима који су решавани у докторској дисертацији, као и стандардима научно-истраживачког рада, а у сагласности је са циљевима дефинисаним на почетку израде дисертације.

3.4. Применљивост остварених резултата

Алгоритам за детекцију и компензацију засићења струјног трансформатора, развијен у оквиру ове докторске дисертације, може се уз одређена прилагођења уградити у реалне уређаје дигиталне релејне заштите. Алгоритам може унапредити постојеће алгоритме диференцијалне заштите, прекострујне заштите и дистантне заштите, како би се избегао њихов неправилан рад у условима засићења струјног трансформатора. Такође, алгоритам се може применити у циљу детекције пролазних кварова на надземним водовима у условима засићења струјног трансформатора. Алгоритам је тестиран на сигнаlima преузетим са релеја у погону. За потребе тестирања алгоритма извршено је испитивање и снимање карактеристика реалног струјног трансформатора, опремом која се иначе користи у пракси. На основу тога може се констатовати да се алгоритам може применити у реалним условима и да се за обезбеђивање улазних података може користити комерцијална опрема.

Алгоритам за детекцију електричног лука на надземним водовима, развијен у оквиру ове докторске дисертације, има директну применљивост у реализацији паметног система аутоматског поновног укључења имуног на засићење струјног трансформатора. Овај алгоритам је такође тестиран на сигнаlima преузетим са релеја у погону, што потврђује

претпоставку да се приказани алгоритам уз одређена прилагођења може уградити у реалне уређаје дигиталне релејне заштите.

3.5. Оцена достигнутих способности кандидата за самостални научни рад

Кандидат Ненад Белчевић је током докторских студија показао све особине неопходне за самосталан научно-истраживачки рад. У прилог томе сведочи и чињеница да постоји већи број научних радова у којима се појављује као аутор, од којих су два рада објављена у међународним часописима са импакт фактором, од чега је један рад категорије M21, а други рад категорије M22.

Начин на који је написана докторска дисертација и научни доприноси који су у њој представљени потврђују спремност кандидата да самостално решава проблеме, почевши од систематичног прегледа доступне литературе, преко уочавања недостатака и ограничења постојећих метода до самосталног развоја алгоритама, њиховог тестирања и верификације. Научни рад кандидата одликује темељан и систематичан приступ решавању проблема.

4. ОСТВАРЕНИ НАУЧНИ ДОПРИНОС

4.1. Приказ остварених научних доприноса

У оквиру предложене докторске дисертације могу се истаћи следећи најзначајнији научни доприноси:

- Развијен је нови алгоритам за детекцију и компензацију засићења струјног трансформатора.
- Постигнута је неосетљивост развијеног алгоритма за детекцију и компензацију засићења струјног трансформатора на присуство реманентног флукса у језгру струјног трансформатора.
- Постигнута је могућност реконструкције како основног хармоника, тако и виших хармоничних компоненти струје квара.
- Могућност примене новог алгоритма за детекцију и компензацију засићења струјног трансформатора, не само у области детекције електричног лука на надземним водовима, већ и у другим областима релејне заштите као што су диференцијална заштита, прекострујна заштита и дистантна заштита.
- Развијен је нови алгоритам за детекцију електричног лука на надземним водовима коришћењем искључиво напонских сигнала.
- Постигнута је неосетљивост алгоритма за детекцију електричног лука на надземним водовима на појаву засићења струјног трансформатора.

4.2. Критичка анализа резултата истраживања

Увидом у постављену проблематику, хипотезе, циљеве истраживања и добијене резултате, констатовали смо да је кандидат успешно одговорио на суштинска питања која су од значаја за решење проблема којим се бави докторска дисертација. Предложени алгоритми тестирани су рачунарским симулацијама. Такође, алгоритми су тестирани на основу сигнала записаних помоћу релеја који се налазе у погону електроенергетског система Републике Србије. Тиме су потврђене полазне претпоставке и остварен је значајан научни допринос. Увидом у приложену литературу, као и у публиковане радове кандидата у међународним часописима са импакт фактором *IET Generation, Transmission & Distribution* и *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, констатујемо да се истраживањима у овој дисертацији дошло до нових резултата који до сада нису били публиковани.

4.3. Верификација научних доприноса

Ненад Белчевић је до сада објавио следеће радове релевантне за докторску дисертацију:

Категорија M21:

1. **Belčević N., Stojanović Z.:** “Using voltage signals for transient fault detection on overhead lines”, International Journal of Electrical Power & Energy Systems, volume 137, May, 2022, (IF=5.659) (ISSN 0142-0615, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2021.107824>)

Категорија M22:

2. **Belčević N., Stojanović Z.:** “Algorithm for phasor estimation during current transformer saturation and/or DC component presence: definition and application in arc detection on overhead lines”, IET Generation, Transmission & Distribution, volume 14, issue 7, pages: 1378 - 1388, April, 2020, (IF=3.229) (ISSN: 1751-8687, DOI: 10.1049/iet-gtd.2019.0787)

Категорија M33:

3. **Belčević N., Stojanović Z.:** “Testing the algorithm for detection of arcing faults on overhead lines”, Symposium INFOTEH-JAHORINA 2018, Session ENS-1-1, 20.-23. March, 2018 (DOI: 10.1109/INFOTEH.2018.8345512)
4. **Belčević N., Stojanović Z.:** “The analysis of electric arc impact on distance relay measurement error”, International symposium on industrial electronics - INDEL, Banja Luka, Session S2B, November, 2018 (DOI: [10.1109/INDEL.2018.8637632](https://doi.org/10.1109/INDEL.2018.8637632))

Категорија M63:

5. **Belčević N., Stojanović Z.:** “Analysis of algorithms for current transformer saturation compensation”, Međunarodno savetovanje Energetika XXXV, Sesija 7, Zlatibor, Jun, 2020

5. ЗАКЉУЧАК И ПРЕДЛОГ

Докторска дисертација кандидата Ненада Белчевића под насловом „Детекција пролазних кварова на надземним водовима у условима zasiћења струјног трансформатора“ у целини је написана у складу са образложењем наведеним у пријави теме и садржи све елементе који су предвиђени Законом о високом образовању, као и прописима Универзитета у Београду и Електротехничког факултета.

У дисертацији је решен актуелан проблем реализације алгорита за детекцију пролазних кварова на надземним водовима у условима zasiћења струјног трансформатора. Сагледана је проблематика и дат је осврт на решења која се јављају у пракси и која су предложена у новијим радовима из поменуте области. Развијени су нови алгоритми који су тестирани и верификовани коришћењем сигнала који су добијени рачунарским симулацијама. Такође, алгоритми су тестирани и верификовани применом сигнала записаних помоћу релеја који се налазе у погону. Показано је да алгоритми омогућавају идентификацију природе квара, без обзира на појаву zasiћења струјног трансформатора.

Резултати су верификовани у радовима објављеним у часописима са *SCI* листе, међународним и домаћим конференцијама. Тиме је показано да је основна теоријска поставка била исправна и да наведени алгоритми представљају значајан допринос на пољу релејне заштите.

Кандидат Ненад Белчевић показао је способност за самосталан научни рад, што потврђује и чињеница да је објавио више научних радова који су проистекли из рада на дисертацији, а у којима је први аутор. Опењујући докторску дисертацију, уз уважавање чињенице да је анализирана проблематика актуелна и савремена и да дисертација садржи научне доприносе,

Комисија констатује да је кандидат Ненад Белчевић, мастер инжењер електротехнике и рачунарства, испунио све услове предвиђене Законом о високом образовању, Статутом и Правилником о докторским студијама Електротехничког факултета Универзитета у Београду.

Имајући у виду наведено, Комисија са задовољством предлаже Наставно-научном већу Електротехничког факултета Универзитета у Београду да се докторска дисертација под називом „Детекција пролазних кварова на надземним водовима у условима zasiћења струјног трансформатора“ кандидата Ненада Белчевића прихвати, изложи на увид јавности и упути на коначно усвајање Већу научних области техничких наука Универзитета у Београду.

Датум 18.12.2024. године

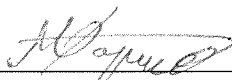
ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ



др Јелисавета Крстивојевић, доцент
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет



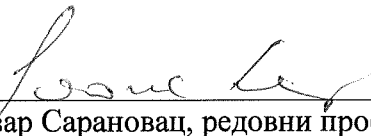
др Јован Микуловић, редовни професор
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет



др Миодраг Форцан, доцент
Универзитет у Источном Сарајеву, Електротехнички факултет



др Томислав Рајић, доцент
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет



др Лазар Сарановац, редовни професор
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет