

## НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ

**Предмет:** Реферат о урађеној докторској дисертацији кандидата Марка Давидовића

Одлуком бр. 5024/13-3 од 29. 4. 2022. године, именовани смо за чланове Комисије за преглед, оцену и одбрану докторске дисертације кандидата Марка Давидовића, под насловом

**„Утицај примене LED технологије на енергетску ефикасност и квалитет електричне енергије у адаптивном уличном осветљењу”**

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

Марко Давидовић је 31. 10. 2013. године уписао докторске академске студије на Електротехничком факултету Универзитета у Београду, на модулу Електроенергетске мреже и системи. Све испите предвиђене наставним планом и програмом докторских студија положио је са просечном оценом 9,5.

Кандидат је 2. 3. 2017. године пријавио тему докторске дисертације. За ментора је предложен др Јован Микуловић, ванредни професор Електротехничког факултета Универзитета у Београду.

Комисија за студије трећег степена је 7. 3. 2017. године разматрала предлог теме за израду докторске дисертације и упутила Наставно-научном већу предлог за именовање Комисије за оцену услова и прихватање теме докторске дисертације.

Наставно-научно веће Електротехничког факултета Универзитета у Београду именovalo је Комисију за оцену услова и прихватање теме докторске дисертације (Одлука бр. 5024/13-1 од 22. 3. 2017. године), у саставу:

1. др Предраг Стефанов, ванредни професор, Универзитет у Београду, Електротехнички факултет,
2. др Владимир Катић, редовни професор, Универзитет у Новом Саду, Факултет техничких наука,
3. др Петар Матавуљ, редовни професор, Универзитет у Београду, Електротехнички факултет,
4. др Зоран Радаковић, редовни професор, Универзитет у Београду, Електротехнички факултет,
5. др Драган Драмлић, научни саветник, Универзитет у Београду, Институт за физику.

Јавна усмена одбрана теме докторске дисертације одржана је 19. 4. 2017. године. Комисија за оцену услова и прихватање теме докторске дисертације оценила је усмену одбрану предложене теме као успешну (оцена „задовољно“).

Наставно-научно веће Електротехничког факултета Универзитета у Београду је 4. 7. 2017. усвојило Извештај Комисије за оцену услова и прихватање теме докторске дисертације. За ментора дисертације именован је др Јован Микуловић, ванредни професор Електротехничког факултета Универзитета у Београду.

Веће научних области техничких наука дало је сагласност на предлог теме докторске дисертације (Одлука бр. 61206-3008/2-17 од 28. 8. 2017. године).

Кандидат је 28. 3. 2022. године предао докторску дисертацију на преглед и оцену. Комисија за студије трећег степена потврдила је 5. 4. 2022. године испуњеност потребних услова за подношење предлога за формирање Комисије за преглед и оцену докторске дисертације Наставно-научном већу Електротехничког факултета Универзитета у Београду.

Наставно-научно веће Електротехничког факултета Универзитета у Београду именовало је Комисију за преглед и оцену докторске дисертације под насловом „Утицај примене LED технологије на енергетску ефикасност и квалитет електричне енергије у адаптивном уличном осветљењу“ (Одлука бр. 5024/13-3 од 29. 4. 2022. године), у саставу:

1. др Јован Микуловић, редовни професор, Универзитет у Београду, Електротехнички факултет,
2. др Предраг Стефанов, ванредни професор, Универзитет у Београду, Електротехнички факултет,
3. др Драган Тасић, редовни професор, Универзитет у Нишу, Електронски факултет,
4. др Миомир Костић, редовни професор, Универзитет у Београду, Електротехнички факултет.
5. др Зоран Радаковић, 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 кандидата, одобрено је продужење рока за завршетак студија до истека троструког броја школских година потребних за реализацију уписаног студијског програма.

Кандидат је у школској 2020/2021. години био у статусу мировања.

## 1.2. Научна област дисертације

Дисертација кандидата Марка Давидовића припада научној области Електротехничко и рачунарско инжењерство, ужа научна област Електроенергетски системи, за коју је матичан Електротехнички факултет Универзитета у Београду. За ментора дисертације одређен је др Јован Микуловић, редовни професор Електротехничког факултета Универзитета у Београду, због истакнутих доприноса у ужој области Електроенергетски системи, а посебно у подобласти енергетске ефикасности и квалитета електричне енергије, којом се бави предметна дисертација.

## 1.3. Биографски подаци о кандидату

Марко Давидовић је рођен 3. јануара 1985. у Београду. Основну школу „Бора Станковић“ у Београду уписао је 1991. године, а завршио 1999. године као носилац Вукове дипломе. Матурирао је 2003. године у Математичкој гимназији у Београду. Основне академске студије завршио је 2011. године на Електротехничком факултету Универзитета у Београду, на Одсеку за енергетику, смер Електроенергетски системи, са просечном оценом 7,55 и оценом

10 на дипломском раду. Мастер академске студије завршио је 2012. године на Електротехничком факултету Универзитета у Београду, модул Електроенергетски системи, са просечном оценом 9,67 и оценом на завршном мастер раду 10.

Докторске студије је уписао 2013. године на Електротехничком факултету Универзитета у Београду, модул Електроенергетске мреже и системи.

Од 2013. године био је ангажован на пројекту Министарства просвете, науке и технолошког развоја Републике Србије "Препоруке за извођење и правилно коришћење нисконапонских електричних и громобранских заштитних инсталација и развој методологије за верификацију њиховог квалитета са аспекта заштите грађевинских објеката од пожара" – ТР36018, чији је руководиоца био проф. др Миомир Костић.

Објавио је 12 радова, од којих 5 као првоименовани аутор. Од објављених радова, 4 рада се односе на област електричног осветљења, а 7 радова на област електричних инсталација.

## **2. ОПИС ДИСЕРТАЦИЈЕ**

### 2.1. Садржај дисертације

Докторска дисертација је по форми и структури 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, ћириличним писмом, и има укупно 150 страна. Садржи 25 слика, 65 табела, 34 нумерисаних једначина и 153 библиографске референце. Делови дисертације су:

- Насловна страна на српском језику
- Насловна страна на енглеском језику
- Страна са информацијама о ментору и члановима комисије
- Страна са подацима о докторској дисертацији на српском језику
- Страна са подацима о докторској дисертацији на енглеском језику
- Садржај
- Текст рада по поглављима:
  1. Увод
  2. Предмет истраживања
  3. Структура докторске дисертације
  4. Дисторзија напона у LED инсталацијама осветљења улица и путева
  5. LED осветљење улица и путева топло-беле и неутралне беле боје светлости: субјективни доживљаји пешака
  6. LED осветљење улица и путева топло-беле и неутралне беле боје светлости: испитивање објективних параметара осветљења и субјективни доживљаји возача
  7. Поређење енергетске ефикасности и трошкова који се односе на конвенционалне и LED инсталације осветљења улица и путева
  8. Закључци
- Списак коришћене литературе
- Прилози
- Биографија аутора
- Библиографија аутора
- Изјава о ауторству
- Изјава о истоветности штампане и електронске верзије докторског рада
- Изјава о коришћењу.

## 2.2. Кратак приказ појединачних поглавља

Прво поглавље даје кратак осврт на историјат LED технологије, њену улогу у јавном осветљењу и њене предности и недостатке са аспекта фотометријских, техничких, здравствених и економских параметара.

Друго поглавље се бави предметом истраживања докторске дисертације и има за циљ да објасни мотивацију за свако од спроведених истраживања.

Треће поглавље даје структуру докторске дисертације по поглављима и описује садржај сваког поглавља.

У четвртом поглављу, а у циљу анализе утицаја натријумових, метал-халогених и LED светиљки на квалитет електричне енергије, мрежним анализатором, и то како у лабораторијским условима тако и на инсталацијама јавног осветљења, извршена су мерења тренутних вредности напона и струје наведених светиљки. Експерименти који су вршени у лабораторијским условима били су подељени у два дела: први, који је подразумевао директно прикључење светиљки на мрежни напон, и други, који је подразумевао прикључење светиљки на мрежни напон преко редне везе отпорника и пригушнице, која је имала за циљ промену степена изобличења напона на светиљкама. Анализом сценарија јавног осветљења са три режима рада, на основу резултата мерења су за четири типичне саобраћајнице одређене процентуалне разлике утрошене активне и реактивне електричне енергије на годишњем нивоу у случају инсталирања LED светиљки у односу на инсталирање конвенционалних (натријумових или метал-халогених) светиљки. Такође је развијен математички модел за прорачун изобличења напона у трофазним инсталацијама уличног осветљења које карактерише једностранни или централни распоред стубова, чија је главна предност у избегавању захтевног прорачуна сопствених и међусобних магнетских флуксева потребних за одређивање сопствене и међусобне адмитансе. Уместо тога, коришћени су параметри мреже у директном, инверзном и нултом компонентном систему, што је учињено комбиновањем две технике које се широко користе у електроенергетици: (1) директном и инверзном Фортескјуовом трансформацијом, и (2) моделима импедансе за директни, инверзни и нулти компонентни систем. За 6 типичних случајева са фотометријски упоредивим светлотехничким решењима са натријумовим и LED светиљкама (по два случаја за централни, двострани наспрамни и једностранни распоред стубова, којима одговарају стандардне светлотехничке класе улице или пута) анализиран је и утицај примене LED светиљки на пресек кабла струјног кола осветљења, ефикасност заштите од електричног удара (у случају квара) и пад напона.

Пето поглавље се бави субјективним доживљајима видљивости и видног комфора пешака при коришћењу LED пакета топло-беле боје и LED пакета неутралне беле боје у уличном осветљењу. Истраживање је засновано на поређењу субјективних доживљаја релевантних параметара квалитета осветљења тротоара улице осветљене помоћу LED пакета топло-беле боје (придружене температуре 3000 K) и помоћу LED пакета неутралне беле боје (придружене температуре 4000 K).

У шестом поглављу је представљено истраживање које има за циљ да одреди преферирану боју светлости LED пакета из перспективе возача, због чега је извршена оцена релевантних параметара квалитета осветљења, и то како објективно тако и субјективно. Прво истраживање је подразумевало два испитивања заснована на видљивости (детекцији) малих мета и пешака, а друго анкету са стварном возњом.

Седмо поглавље је посвећено поређењу LED светиљки и светиљки са натријумовим изворима високог притиска или метал-халогеним изворима са керамичким гориоником које се примењују за осветљење улица или путева намењених за моторизовани или мешовити саобраћај. Поређење је извршено са становишта потрошње електричне енергије и економских показатеља.

Свако од поглавља 4–7 садржи и преглед публикованих резултата у вези са темом поглавља.

На крају рада, у оквиру закључног поглавља, сажето су приказани сви важнији резултати истраживања у оквиру докторске дисертације, као и главни доприноси дисертације у вези са утврђивањем објективних и субјективних показатеља оправданости примене LED технологије у уличном осветљењу са аспекта енергетске ефикасности, квалитета електричне енергије, утицаја на електричну инсталацију уличног осветљења, боје светлости и економских параметара.

### 3. ОЦЕНА ДИСЕРТАЦИЈЕ

#### 3.1. Савременост и оригиналност

Докторска дисертација под насловом „Утицај примене LED технологије на енергетску ефикасност и квалитет електричне енергије у адаптивном уличном осветљењу” представља оригиналан научноистраживачки рад, који је настао као резултат вишегодишњих истраживања кандидата у области енергетске ефикасности и квалитета електричног осветљења.

У протеклих двадесетак година значајно је повећана светлосна искористивост LED светиљки, док је за исто време њихов животни век више него удвостручен. Истовремено су се у великој мери смањиле цене LED светиљки, због чега је LED осветљење постало конкурентно конвенционалном осветљењу и по питању иницијалних трошкова, а не само по питању трошкова утрошене електричне енергије и одржавања. Повећање енергетске ефикасности, заједно са смањењем цене, омогућило је произвођачима LED технологије да обезбеде побољшану боју светлости, репродукцију боја, расподелу светлости и изглед светиљки, као и унапређено управљање LED производима. Масовна примена LED технологије у унутрашњем и спољашњем (јавном) осветљењу, као и примена телеменаџмент система који омогућавају различите режиме осветљења, довела је до значајног смањења потрошње електричне енергије у осветљењу улица и путева.

Један од главних проблема коришћења LED технологије у електричном осветљењу је њен утицај на квалитет електричне енергије у нисконапонској дистрибутивној мрежи. Након замена конвенционалних светиљки LED светиљкама, уочени су проблеми са вишим хармоницима у електричним инсталацијама осветљења, и то у погледу дисторзије напона и струје, као и проблеми са ниским факторима снаге LED светиљки при смањеном светлосном флуксу у комбинованим режимима адаптивног уличног осветљења. Из наведених разлога, релевантни електрични параметри светиљки често нису усаглашени са параметрима који су декларисани од стране произвођача, што може довести до погрешних закључака по питању уштеда утрошене електричне енергије, као примарног циља замене конвенционалних светиљки LED светиљкама у инсталацијама уличног осветљења. Наиме, поред потрошње електричне енергије од стране самих извора, битно је сагледати и губитке електричне енергије у електроенергетској мрежи, који зависе од активне снаге, али и од реактивне снаге основног хармоника и виших хармоника струје. Поред тога, наведене електричне карактеристике утичу и на димензионирање пресека напојних проводника, а тиме и на комплетну инвестицију. Други проблем при замени конвенционалних светиљки LED светиљкама представља неадекватан избор LED светиљки у погледу постизања еквивалентних фотометријских параметара. У пројектантској пракси, избор LED светиљки се врши без уважавања ефеката мезопског виђења, чиме се занемарује предност LED технологије да се са мање лумена постигне већа визуелна ефикасност.

Предметна докторска дисертација се бави утврђивањем реалних показатеља квалитета и оправданости примене LED технологије у уличном осветљењу са аспекта енергетске

ефикасности, квалитета електричне енергије, параметара електричних инсталација уличног осветљења, боје светлости и економских параметара. Научни допринос дисертације се огледа у развоју оригиналних методологија како за објективну тако и за субјективну евалуацију свих параметара квалитета LED уличног осветљења. У дисертацији су утврђене зависности активне снаге, реактивне снаге, фактора снаге, THD напона и THD струје од светлосног флукса за различите типове светилки, на основу којих су дати поступци и мере за смањење негативних утицаја LED светилки на квалитет електричне енергије. Применом утврђених зависности које се односе на активну снагу, представљене су могућности за уштеде електричне енергије у уличном осветљењу на годишњем нивоу које обезбеђује примена LED светилки уместо конвенционалних светилки и у нормалном и у комбинованом режиму адаптивног уличног осветљења, као и могућности за додатне уштеде електричне енергије уважавањем ефеката мезопског виђења. Представљена је и свеобухватна анализа којом су утврђене стварне могућности за уштеде електричне енергије и стварни финансијски ефекти примене LED технологије у уличном осветљењу.

У дисертацији је такође извршено поређење квалитета уличног осветљења реализованог помоћу LED чипова топло-беле и помоћу LED чипова неутралне беле боје, на основу истраживања субјективног доживљаја пешака и возача. Имајући у виду релевантне референце које се баве здравственим аспектима употребе LED светилки у уличном осветљењу, дате су препоруке у вези са LED чиповима одговарајуће придружене температуре боје за примену у уличном осветљењу.

### 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 наведена у дисертацији броји 153 библиографске јединице, на основу чега се може закључити да је кандидат остварио темељан увид у резултате досадашњих истраживања у предметној научној области. У оквиру наведене литературе налазе се и кандидатови радови који су публиковани у међународним часописима са Impact Factor-ом, а који су проистекли из рада на докторској дисертацији или су у директној вези са темом дисертације.

### 3.3. Опис и адекватност примењених научних метода

Истраживање спроведено у дисертацији засновано је на експерименталним и теоријским методама које подразумевају мерења и прорачун релевантних електричних величина и параметара светилки при истраживањима у лабораторијским условима, као и на електричним инсталацијама уличног осветљења. Примена наведених метода истраживања обухвата избор адекватне мерне опреме и експерименталне поставке, мерење релевантних величина и параметара, обраду резултата мерења, развој методологије за евалуацију параметара енергетске ефикасности и квалитета електричне енергије, као и извођење одговарајућих закључака у вези са конвенционалним и LED осветљењем улица и путева. Провера тачности развијене методологије и пратећег софтвера извршена је на основу одговарајућих мерења на електричним инсталацијама јавног осветљења.

У дисертацији су такође извршена истраживања у циљу прикупљања квантитативних података о визуелним перформансама LED осветљења и субјективним оценама учесника у саобраћају. На основу резултата субјективних евалуација пешака и возача, дате су препоруке за примену LED пакета одговарајуће боје светлости. У овим истраживањима су примењене методе статистичке и компаративне анализе, метода анкетног истраживања и поступци израде фотометријских прорачуна коришћењем специјализованог софтвера.

Након извршених прорачуна, мерења, анализа и симулација урађена је техно-економска анализа оправданости употребе LED технологије у уличном осветљењу. Предложена је

унапређена процедура економског поређења светлотехничких решења, а примењена анализа осетљивости обухватила је три важна параметра: стопу актуелизације, цену електричне енергије и животни век LED пакета.

Примењене методе су у потпуности примерене проблемима који су решавани у дисертацији, што је довело до остварења постављених циљева дисертације.

#### 3.4. Применљивост остварених резултата

Истраживања утицаја примене LED технологије на енергетску ефикасност и квалитет електричне енергије у јавном осветљењу, која су урађена у оквиру докторске дисертације, имају велики практичан значај имајући у виду извршене прорачуне, мерења, анализе и симулације, као и урађену техно-економску анализу оправданости употребе LED технологије у уличном осветљењу.

Лабораторијска мерења електричних параметара LED светиљки показала су да смањивање светлосног флукса LED светиљки утиче на смањење вредности фактора снаге светиљки. Спроведеним лабораторијским истраживањима се није дошло до одговора на питање да ли спектар струје зависи од изобличења напона, што је наведено као циљ потребних истраживања да би се дошло до модела са општом могућношћу примене на запрљане мреже и дугачке низове стубова осветљења. Оправдање за ограничене експерименте, а самим тим и ограничене закључке, представља недоступност опреме (извор електричне енергије променљивог напонског спектра). Најреалнија опција остварења изобличења напона у ширем опсегу је проширење експеримената додавањем релативно лако остваривог јефтиног нелинеарног оптерећења паралелно са LED изворима, што може остати као тема за даљи рад кандидата и проширење општости резултата докторске дисертације. За уочене ниске вредности фактора снаге светиљки (испод 0,9) предложена је употреба пригушнице у циљу поправке фактора снаге.

Анализом сценарија јавног осветљења са три режима рада, за четири типичне саобраћајнице одређене су процентуалне разлике утрошене активне и реактивне електричне енергије на годишњем нивоу у случају инсталирања LED светиљки уместо конвенционалних (натријумових и метал-халогених) светиљки. Показано је да примена LED светиљки обезбеђује преко 50% уштеда у потрошњи активне електричне енергије у односу на конвенционалне светиљке на свим разматраним саобраћајницама, осим у случају осветљења аутопута где уштеда активне електричне енергије износи преко 40%.

Развијен математички модел и одговарајући софтвер омогућавају израчунавање пада напона и хармонијске дисторзије у инсталацијама осветљења улица и путева у случају несиметричног и нелинеарног LED оптерећења. Развијена методологија омогућава да се утврди максималан дозвољен број LED светиљки у трофазним инсталацијама уличног осветљења у циљу одржања квалитета електричне енергије у толерисаним границама. У циљу адекватног поређења максималног дозвољеног броја стубова у инсталацијама уличног осветљења реализованих помоћу натријумових и LED извора, уважен је и критеријум пада напона и критеријум ефикасности TN система заштите.

Истраживање посвећено поређењу објективних и субјективних карактеристика уличног осветљења реализованог помоћу LED светиљки топло-беле и неутралне беле боје светлости показују незнатну предност у корист осветљења реализованог светиљкама топло-беле боје светлости у погледу уочавања малих препрека и пешака.

Резултати истраживања добијени применом развијене опште методологије за поређење различитих инсталација осветљења улица и путева показују да се применом LED светиљки уместо светиљки са натријумовим или метал-халогеним изворима са керамичким гориоником могу постићи значајне уштеде енергије.

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

Марко Давидовић је током докторских студија, као и током целокупног досадашњег рада, показао све особине неопходне за самосталан научноистраживачки рад. У прилог томе сведочи и чињеница да је до сада публиковао укупно 12 радова. Као првоименовани аутор кандидат је из области којом се бави дисертација публиковао два рада у врхунским међународним часописима (M21), један рад у истакнутом међународном часопису (M22) и један рад у међународном часопису (M23).

Начин на који је написана докторска дисертација и научни доприноси који су у њој представљени потврђују спремност кандидата за самосталан научни рад, почевши од систематичног прегледа доступне литературе, преко уочавања недостатака и ограничења постојећих метода, до развоја методологије која превазилази уочене недостатке. Научни рад кандидата одликује темељан и систематичан приступ решавању научних проблема.

## **4. ОСТВАРЕНИ НАУЧНИ ДОПРИНОСИ**

### 4.1. Приказ остварених научних доприноса

Најзначајнији научни доприноси коју су остварени у оквиру докторске дисертације огледају се у следећем:

- Утврђене су зависности активне снаге, реактивне снаге, фактора снаге, THD вредности струје од светлосног флукса за различите типове светиљки.
- Дати су поступци за прорачун оптималних индуктивности пригушница за поправку фактора снаге LED светиљки.
- Развијен је математички модел за прорачун изобличења напона у трофазним инсталацијама уличног осветљења који користи параметре мреже у директном, инверзном и нултом компонентном систему.
- Развијен је алгоритам са пратећим рачунарским програмом за одређивање максималног броја светиљки за који нису прекорачене границе које се односе на пад напона, THD вредности напона и појединачне хармонике напона у нормалном и редукованим режимима осветљења.
- Представљене су могућности за уштеду електричне енергије у уличном осветљењу на годишњем нивоу које обезбеђује примена LED светиљки уместо конвенционалних светиљки у нормалном и редукованим режимима осветљења, као и могућности за додатне уштеде електричне енергије уважавањем мезопских ефеката.
- Утврђене су предности и недостаци примене LED технологије са аспекта параметара инсталације уличног осветљења (пресека кабла, пада напона и ефикасности TN система заштите).
- Извршено је поређење субјективних показатеља квалитета уличног осветљења реализованог помоћу LED чипова топло-беле и неутралне беле боје.
- На основу резултата субјективних евалуација пешака и возача, дате су препоруке за примену LED пакета одговарајуће боје светлости.
- Урађена је техно-економска анализа оправданости употребе LED технологије у уличном осветљењу.

### 4.2. Критичка анализа резултата истраживања

При замени конвенционалних светиљки LED светиљкама, долази до проблема са дисторзијом напона и струје, посебно због примене телеменаџмент система који омогућавају



различите режиме осветљења. Дисторзија напона и струје LED светиљки при смањеном светлосном флуксу у комбинованим режимима адаптивног уличног осветљења доводи до смањења фактора снаге светиљки. Из наведених разлога, релевантни електрични параметри светиљки често нису усаглашени са оним који су декларисани од стране произвођача, што може довести до погрешних закључака по питању уштеда утрошене електричне енергије при масовном коришћењу LED светиљки у инсталацијама уличног осветљења. Осим тога, избор LED светиљки у пројектантској пракси врши се без уважавања ефеката мезопског виђења, чиме се занемарује већа ефикасност LED технологије у том погледу. У циљу постизања јасних закључака, смерница и препорука у вези са наведеним проблемима, у докторској дисертацији су приказани резултати захтевног проучавања проблема енергетске ефикасности и квалитета електричне енергије при нормалном режиму и режиму са редукованим светлосним флуksom LED уличног осветљења.

Због веће светлосне искористивости комерцијално доступних LED пакета неутралне беле боје у односу на LED пакете топло-беле боје, пројектанти уличног осветљења данас углавном бирају LED пакете неутралне беле боје. У циљу одређивања префериране боје светлости LED пакета, у предметној докторској дисертацији је извршена оцена релевантних параметара квалитета осветљења. Показано је да одлучујући критеријум за избор боје светлости LED пакета намењених за улично осветљење не треба да буде заснован на светлосној искористивости светиљки, већ на субјективним доживљајима пешака и возача.

Један део докторске дисертације посвећен је адекватном поређењу LED светиљки са светиљкама са натријумовим изворима високог притиска или метал-халогеним изворима које се примењују за осветљење улица или путева. Поређење је извршено са становишта потрошње електричне енергије и економских показатеља. Осим уважавања утицаја стопе актуелизације и цене електричне енергије, спроведена анализа осетљивости је обухватила и утицај животног века LED пакета. Предностима које се могу остварити применом адаптивних система такође је посвећена потребна пажња.

Сагледавањем постављених циљева истраживања, полазних хипотеза и остварених резултата, Комисија закључује да је кандидат Марко Давидовић успешно одговорио на сва релевантна питања из области која је предмет докторске дисертације. Комисија констатује да су научни доприноси остварени у докторској дисертацији објављени у релевантним међународним часописима: *Energy*, *IEEE Access*, *Lighting Research & Technology* и *Electrical Engineering*, чиме је потврђено да се истраживањима у оквиру дисертације дошло до нових сазнања и резултата који до сада нису били публиковани.

#### 4.3. Верификација научних доприноса

Марко Давидовић је објавио 12 радова, од којих 5 у међународним часописима са SCI листе. Као првоименовани аутор кандидат је из области којом се бави дисертација публиковао 4 рада у међународним часописима са SCI листе. Такође је публиковао 1 рад у националном часопису, 5 радова у зборницима скупова националног значаја и 1 рад на скупу националног значаја штампан у изводу. Коаутор је и једног техничког решења.

Научни доприноси који представљају резултат истраживања у оквиру докторске дисертације публиковани су у два рада у врхунским међународним часописима (M21), један рад у истакнутом међународном часопису (M22) и један рад у међународном часопису (M23). Списак радова је дат у наставку, при чему су звездицом означени радови који су проистекли из докторске дисертације.

##### Категорија M21a:

[1]\* Davidovic M., Kostic M.: *Comparison of energy efficiency and costs related to conventional and LED road lighting installations*, *Energy*, Vol. 254, 2022, 124299, DOI: 10.1016/j.energy.2022.124299 (M21a) (IF 7.147).

#### Категорија M21:

- [1]\* Davidovic M., Djokic L., Cabarkapa A., Djuretic A., Skerovic V., Kostic M.: *Drivers' preference for the color of LED street lighting*, IEEE Access, Vol. 7, 2019, pp. 72850-72861, DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2920737 (M21) (IF 3.745).

#### Категорија M22:

- [1]\* Davidovic M., Djokic L., Cabarkapa A., Kostic M.: *Warm white versus neutral white LED street lighting: Pedestrians' impressions*, Lighting Research & Technology, Vol. 51, Issue 8, 2019, pp. 1237-1248, DOI: 10.1177/1477153518804296 (M22) (IF 2.226)
- [2] Hadziefendic N., Davidovic M., Djordjevic V., Kostic M.: *The Impact of an Incomplete Overlap of a Copper Conductor and the Corresponding Terminal on the Contact Temperature*, IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology, Vol. 7, Issue 10, 2017, pp. 1644-1654, DOI: 10.1109/TCPMT.2017.2720421 (M22) (IF 1.581).

#### Категорија M23:

- [1]\* Davidovic M., Djordjevic N., Mikulovic J., Kostic M., Radakovic Z.: *Voltage distortion in LED street lighting installations*, Electrical Engineering, Vol. 103, Issue 4, 2021, pp. 2161-2180, DOI: 10.1007/s00202-020-01181-6 (M23) (IF 1.836).

#### Категорија M52:

- [1] Давидовић М., Хаџиефендић Н., Трифуновић Ј.: *Опасност од настанка пожара услед коришћења електроинсталационих компоненти лошег квалитета – продужни каблови*, Безбедност, бр. 1, 2013, стр. 140-159.

#### Категорија M63:

- [1] Хаџиефендић Н., Костић Н., Давидовић М.: *Кварови у нисконапонским електричним инсталацијама и њихова детекција употребом савремених заштитних компоненти*, Зборник Друге регионалне међународне конференције "Примењена заштита и њени трендови", Златибор 2015, стр. 205-215.
- [2] Хаџиефендић Н., Костић Н., Давидовић М.: *Практична искуства настала верификацијом квалитета нисконапонских електричних инсталација са посебним освртом на заштиту од пожара и електричног удара*, Зборник Треће регионалне међународне конференције "Примењена заштита и њени трендови", Златибор 2016, стр. 155-168.
- [3] Хаџиефендић Н., Таталовић А., Давидовић М., Вукајловић В., Трифуновић Ј.: *Мogućност унапређења заштите објеката од пожара инсталирањем компоненти за детекцију редног електричног лука*, Зборник радова III Саветовања у области заштите од пожара, Београд 2013, стр. 45-66.
- [4] Хаџиефендић Н., Костић Н., Давидовић М., Таталовић А., Зарев И.: *Унапређена методологија за верификацију квалитета нисконапонских електричних инсталација*, Зборник радова V Саветовања у области заштите од пожара, Београд 2015, стр. 35-52.
- [5] Таталовић А., Давидовић М., Хаџиефендић Н., Костић Н.: *Софтвер за верификацију квалитета нисконапонских електричних инсталација*, Зборник радова V Саветовања у области заштите од пожара, Београд 2015, стр. 53-69.

#### Категорија М64:

- [1] Малешевић Б., Бањац Б., Ненезић М., Давидовић М., Спасић Д., Ћирковић В., Ђурашевић Б., Белојевић Б.: *Реализација неких алгоритама теорије Groebner-ових база у програмском језику Java и програмском пакету Matlab*, Четврти симпозијум "Математика и примене", Београд 2013.

#### Категорија М85:

- [1] Костић М., Давидовић М., Таталовић А., *Софтвер за унапређење процедуре верификације квалитета електричних инсталација*, 2015.

## **5. ЗАКЉУЧАК И ПРЕДЛОГ**

Докторска дисертација кандидата Марка Давидовића под насловом „Утицај примене LED технологије на енергетску ефикасност и квалитет електричне енергије у адаптивном уличном осветљењу” у целини је написана у складу са образложењем наведеним у пријави теме и испуњава све суштинске и формалне услове предвиђене Законом о високом образовању, као и прописима Универзитета у Београду и Електротехничког факултета.

У дисертацији је развијена методологија за евалуацију релевантних параметара квалитета LED уличног осветљења. У дисертацији су утврђене зависности активне снаге, реактивне снаге, фактора снаге, THD вредности напона и THD вредности струје од светлосног флуksа за различите типове светилки, на основу којих су дати поступци и мере за смањење негативних утицаја LED светилки на квалитет електричне енергије. Применом утврђених зависности које се односе на активну снагу представљене су могућности за уштеде електричне енергије у уличном осветљењу на годишњем нивоу које обезбеђује примена LED светилки уместо конвенционалних светилки у нормалном и у комбинованом режиму адаптивног уличног осветљења, као и могућности за додатне уштеде електричне енергије уважавањем ефеката мезопског виђења. Представљена је и свеобухватна анализа којом су утврђене стварне могућности за уштеде електричне енергије и стварни финансијски ефекти примене LED технологије у уличном осветљењу. Утврђене су и предности и недостаци примене LED технологије са аспекта параметара инсталације уличног осветљења (пресека кабла, пада напона и ефикасности TN система заштите). На основу резултата субјективних евалуација пешака и возача, дате су препоруке за примену LED пакета одговарајуће боје светлости.

Докторска дисертација кандидата Марка Давидовића представља резултат вишегодишњег истраживачког рада у области енергетске ефикасности и квалитета електричног осветљења. Кандидат Марко Давидовић је објавио 12 радова, од којих 5 као првоименовани аутор. Научне доприносе који представљају резултат истраживања у оквиру докторске дисертације кандидат је публиковао као првоименовани аутор у два рада у врхунским међународним часописима, једном раду у истакнутом међународном часопису и једном раду у међународном часопису. На основу увида у докторску дисертацију и објављене радове кандидата, Комисија закључује да докторска дисертација представља оригиналан и савремен научни допринос.

Током израде докторске дисертације, као и током целокупног трајања докторских студија, кандидат Марко Давидовић је показао склоност ка научноистраживачком раду и способност за самосталан научноистраживачки рад. Комисија констатује да је кандидат Марко Давидовић, 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 „Утицај примене LED технологије на енергетску ефикасност и квалитет електричне енергије у адаптивном уличном осветљењу” кандидата Марка Давидовића изложи на увид јавности, прихвати и упути на коначно усвајање Већу научних области техничких наука Универзитета у Београду.

У Београду, 25. 6. 2022. године

#### ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ



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



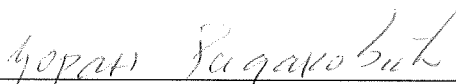
Др Предраг Стефанов, ванредни професор  
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет



Др Драган Тасић, редовни професор  
Универзитет у Нишу – Електронски факултет



Др Миомир Костић, редовни професор  
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет



Др Зоран Радаковић, редовни професор  
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет