

УНИВЕРЗИТЕТ У ПРИШТИНИ
СА ПРИВРЕМЕНИМ СЕДИШТЕМ У КОСОВСКОЈ МИТРОВИЦИ
ФАКУЛТЕТ ТЕХНИЧКИХ НАУКА

НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ

Предмет: Извештај комисије са оценом урађене докторске дисертације
мр Андреја Ђуретића

На основу члана 62. став 1. тачка 16., члана 142. став 3. и 4. Статута Факултета техничких наука у Косовској Митровици, а у складу са одредбама Правилника о пријави, изради и одбрани докторске дисертације, одлуком Наставно-научног већа Факултета техничких наука бр. 623/3-3 од 08.06.2016. године, именовани смо за чланове комисије за преглед и оцену урађене докторске дисертације кандидата мр Андреја Ђуретића, дипл. ел. инж. под насловом:

„ТЕХНО-ЕКОНОМСКА АНАЛИЗА СВЕТЛОСНИХ ИЗВОРА У ИНСТАЛАЦИЈАМА ЈАВНОГ ОСВЕТЉЕЊА КАО ОСНОВ ЗА ОДРЕЂИВАЊЕ ОПРАВДАНОСТИ ЗАМЕНЕ НАТРИЈУМОВИХ СИЈАЛИЦА ВИСОКОГ ПРИТИСКА ЛЕД ИЗВОРИМА“

Пошто смо прегледали урађену дисертацију и приложену документацију, подносимо Наставно-научном већу следећи

ИЗВЕШТАЈ

1. ПОДАЦИ О КАНДИДАТУ

1.1. Биографски подаци

Кандидат Андреј Ђуретић рођен је 09.04.1974. године у Београду. Основну школу и гимназију завршио је у Београду. Дипломирао је 2002. године на Енергетском одсеку Електротехничког факултета у Београду, смер Енергетски претварачи и погони. Звање магистра наука стекао је на Електротехничком факултету у Београду одбравивши 10.07.2012. године тезу под именом „Техноекономска анализа оправданости употребе електронских предспojних уређаја у уличном осветљењу“. Вишегодишње искуство у фотометријском пројектовању стекао је радећи у компанији Minel-Schreder, најпре као инжењер пројектант, затим као водећи инжењер и од 2008. године до данас као руководилац Бироа за маркетинг. Последњих година активно се бави праћењем развоја предспojних уређаја у светиљкама и имплементацијом контролних система за даљинско управљање инсталација осветљења у земљи и иностранству (БиХ, Словенија, Бугарска, Израел, Естонија, Шведска). Учествовао је као носилац пројекта у постављању прве инсталације даљинског управљања у јавном осветљењу у Србији (Ковин), чему су претходили бројни пилот пројекти. Од самог почетка примене ЛЕД извора у јавном осветљењу кандидат активно прати развој технологије и учествује у развоју ЛЕД светиљки у својој компанији. Такође учествује у пројектовању аутономних соларних система. Аутор је већег броја научних и стручних радова, како у истакнутом међународном часопису, тако и на међународним и домаћим конференцијама. Испред матичне компаније Schreder задужен је за тунелске контролне системе за регион Југоисточне Европе. Члан је Управног одбора Српског друштва за осветљење, где

активно учествује у организацији стручних семинара и избору радова који ће се презентовати.

1.2. Стечено научно – истраживачко искуство

Кандидат је магистрирао на Електротехничком факултету у Београду, одбранивши 10.07.2012. године тезу под именом „Техноекономска анализа оправданости употребе електронских предспојних уређаја у уличном осветљењу“. Ментор при изради магистарског рада био је др Миомир Костић, редовни професор Електротехничког факултета у Београду. Кандидат се дужи низ година бави темама из области Електричног осветљења, а убрзан развој извора светлости (ЛЕД), предспојне опреме (улазак електронских интелигентних уређаја у свет осветљења) и контролних система отвара широко поље истраживања у сегменту који у Србији још увек није довољно присутан и праћен адекватном научном литературом. Кандидат се у магистарском раду бавио имплементацијом електронских баласта уместо традиционалне електромагнетске предспојне опреме, а резултати рада су објављени у врхунском међународном часопису (M21). Током бављења техником осветљења, кандидат је излагао већи број радова на разним домаћим и међународним конференцијама.

БИБЛИОГРАФИЈА

Рад у водећем међународном часопису (M21)

1. A. Djuretic, M.Kostic „Comparison of electronic and conventional ballasts used in roadway lighting“, *Lighting Research and Technology*, 2014, 46, 407-420

Рад у часопису међународног значаја (M23)

1. A.Djuretic, N.Arsic „Lighting technology in underground mines“, *Metalurgia International*, 2013, Vol XVIII Special issue No. 8, 294-299 (M23)

Саопштења на међународним скуповима штампана у изводу (M34)

1. V. Škerović, M. Gordić, N. Galović, A. Đuretić “Parametri vidljivosti kao ključni aspekt bezbednosti pešačkih prelaza”, 9. Međunarodna Konferencija, “Bezbednost saobraćaja u lokalnoj zajednici”, Zaječar, Srbija, 9-11. April 2014.
2. A. Djuretic, N. Strbac-Hadzibegovic “Implementation of dynamic lighting in illumination of Main post office building in Belgrade”, The 5th Balkan Conference on Lighting, Balkan Light 2012, Belgrade, Serbia, October 3-6, 2012.
3. A. Djuretic, M. Smilic „Implementation of wirelees control systems in public lighting installations“, 22nd International Electrotechnical and Computer Science Conference, ERK 2013, Portorož, Slovenia, 16-18 September 2013.
4. A. Djuretic, N. Arsic, M. Petrovic „LED Technology in public lighting installations – facts or fiction“, XLVIII International Scientific Conference on Information, Communication and Energy systems and Technologies, iCEST 2013, Ohrid, Macedonia, 26-29 June 2013.
5. A. Djuretic, Z. Spalevic, N. Arsic, M. Smilic „Energy saving in outdoor lighting installations based on integration of telemanagement systems“, International Congress on

Energy Efficiency and Energy Related Materials, ENEFM 2013, Kemer-Antalya, Turkey, October 9-12, 2013.

Саопштења на скупу од националног значаја штампана у изводу (M64)

1. A. Đuretić „Poređenje LED i natrijumovih izvora u instalacijama javnog osvetljenja“, Sajam Energetske Efikasnosti, Obnovljivi izvori energije, SDIT, Požarevac, Srbija, 2013.
2. A.Đuretić „Najnoviji trendovi u tunelskom osvetljenju“, Savetovanje Srpskog društva za osvetljenje, Tara, 2004.
3. A.Đuretić „Osvetljenje pešačkih prelaza“, Savetovanje Srpskog društva za osvetljenje, Kopaonik, 2005.
4. A.Đuretić „“Solid State“ osvetljenje – novi trendovi u tehnologiji osvetljenja“, Savetovanje Srpskog društva za osvetljenje, Ivanjica, 2007.
5. A.Đuretić „“Telemenadzment“ – Pregled sistema za daljinsko upravljanje i nadzor u javnom osvetljenju“, Savetovanje Srpskog društva za osvetljenje, Divčibare, 2009.
6. A.Đuretić „Istine i zablude o LED tehnologiji“, Savetovanje Srpskog društva za osvetljenje, Kopaonik, 2010.
7. A.Đuretić „Solarno napajanje u tehnici osvetljenja“, Savetovanje Srpskog društva za osvetljenje, Kladovo, 2011.
8. A.Đuretić „Primena dinamičkih scenarija u dekorativnom osvetljenju Glavne pošte u Beogradu“, Savetovanje Srpskog društva za osvetljenje, Trebinje, 2012.

2. ПРЕДМЕТ И ЦИЉ ИСТРАЖИВАЊА

Изузетно брз развој ЛЕД технологије у ХХИ веку, пре свега као последица проналаска високо ефикасног ЛЕД пакета беле боје омогућио је употребу ЛЕД технологије и у уличном осветљењу, што је доскора било незамисливо. Извори светлости који су још увек најраспрострањенији у инсталацијама уличног осветљења (натријумови и метал-халогени извори високог притиска) имају такву ефикасност (lm/W) којој ЛЕД извори (у прошлости коришћени углавном као индикаторске лампице или позадинско светло за нумеричке дисплеје на калкулаторима) донедавно нису могли парирати. Сада, када је ефикасност ЛЕД пакета достигла или премашила ефикасност свих конвенционалних извора светлости, захваљујући многим другим предностима (дуг животног век, могућност управљања, континуирана регулација светлосног флукса, светлост беле боје, тренутно стартовање при прикључењу на мрежу...), ЛЕД технологија се намеће као најбоље решење у уличном осветљењу. Имајући у виду агресиван маркетиншки пласман и огромна средства која су уложена у развој ЛЕД технологије, намеће се закључак да ће већ у наредних 20 година ЛЕД извори бити доминантни и готово у потпуности заменити све познате изворе светлости.

Докторска дисертација се бави условима, могућностима и оправданошћу примене ЛЕД извора у инсталацијама уличног осветљења.

Израда докторске дисертације је базирана на већ постављеној тест инсталацији, где су поређене светилке са натријумовим сијалицама високог притиска и ЛЕД изворима. Извршено је постављање и система даљинског управљања (тзв. телеменаџмент система), који омогућава континуиран надзор тест инсталације, као и мерења релевантних параметара (контролери су опремљени мерним уређајима високе класе тачности који дају информације о напону, струји, фактору снаге и броју радних сати,

али и о евентуалним кваровима и тренутном статусу сваке појединачне светиљке или групе светиљки).

Циљ истраживања је да се са техноекономског аспекта утврди оправданост замене светиљки са натријумовим изворима високог притиска (најзаступљенијим у инсталацијама уличног осветљења) ЛЕД светиљкама. Према сазнањима којима располаже кандидат, не постоји много оваквих истраживања, јер се најчешће апприори узима да су ЛЕД светиљке боље решење, које ће донети значајне уштеде у потрошњи електричне енергије. Често се дешава да код малобројних истраживања која су се бавила овом тематиком нису добро дефинисани почетни услови под којима се врше мерења и поређење два типа извора, па резултат нема готово никакву употребну вредност и не даје одговор на релевантна питања. Циљ истраживања био је да се кроз свеобухватну анализу (узимајући у обзир и цену ЛЕД светиљки, која је још увек приметно виша од цене конвенционалних светиљки) утврди оправданост имплементације ЛЕД извора, као и стратегија њихове могуће примене и временски период у којем ће се ова промена десити.

3. НАУЧНЕ МЕТОДЕ ИСТРАЖИВАЊА

Цео поступак израде докторске дисертације може се методолошки сумирати кроз следећи низ активности:

- 1) Избор одговарајуће локације на којој је постављена тест инсталација на основу дефинисаних почетних услова (геометрија и светлотехничка класа саобраћајнице; тип и снага постојећих светиљки са натријумовим изворима на основу којих је извршен избор адекватних ЛЕД светиљки фотометријским прорачунима)
- 2) Израда фотометријских прорачуна коришћењем специјализованог програмског пакета.
- 3) Подешавање једнаких вредности нивоа сјајности за оба дела трасе (једног дела са натријумовим и другог са ЛЕД светиљкама) коришћењем контролног система. Редукцијом светлосног флукса и снаге (светиљке имају интегрисан контролер и димабилни електронски предспојни уређај) обезбеђују се једнаки почетни услови који ће омогућити да извршена мерења дају употребљиве резултате.
- 4) Мерења релевантних фотометријских и електричних величина коришћењем одговарајућих мерних уређаја: дигитална бројила, мрежни анализатор, луксметар, интегрисана бројила у контролерима светиљки, фотометријска камера са широкоугаоним објективом за мерење и снимање сјајности читаве „сцене“ (путног правца и околине) током вожње
- 5) Урађен је детаљан анкетни упитник на основу којег ће у периоду тестирања бити организована вожња на тест локацији, након чега је сваком од испитаника дат упитник са питањима релевантним за анализу, а која се тичу њиховог субјективног доживљаја квалитета осветљења
- 6) Компаративна анализа ЛЕД и натријумових светиљки на основу резултата електричних мерења

- 7) Анализа резултата анкете коришћењем статистичке методе обраде података
- 8) Прорачун пада напона као ограничавајућег фактора у пројектовању инсталације уличног осветљења
- 9) Креирање сценарија димовања инсталације осветљења коришћењем контролног система у циљу дефинисања пројектованих уштеда електричне енергије (пре почетка мерења, у фабричким условима је извршено мерење и дефинисан однос снаге и светлосног флукса за оба типа извора у зависности од контролног сигнала)
- 10) Анализа оправданости употребе ЛЕД светилки коришћењем методе актуелизације трошкова

За израду докторске тезе коришћено је више програмских пакета и метода који су прилагођени теми, плану истраживања и циљевима, а који имају теренски и кабинетски карактер.

Синтеза резултата спроведених анализа и мерења свих појединачних карактеристика оба типа извора светлости (уз систематизовано прикупљање и проучавање доступне литературе и анализу постојећих научних резултата и достигнућа из области дисертације) даје одговор на питање оправданости замене натријумових и имплементације ЛЕД извора у инсталацијама уличног осветљења, уз предлог могућих реконструкција инсталације уличног осветљења на основу резултата истраживања.

4. ИЗВЕШТАЈ О УРАЂЕНОЈ ТЕЗИ, РЕЗУЛТАТИ И НАУЧНИ ДОПРИНОС

Докторска дисертација има укупно 229 страна (249 са насловом, захвалницом, резимеом на српском и енглеском језику, садржајем и изјавама о ауторству, истоветности штампане и електронске верзије докторског рада и коришћењу), 99 референци, 93 слике, 54 табеле и 13 графикана.

Основни задатак овог истраживања које је послужило као основ за израду докторске дисертације био је да се покаже оправданост реконструкције инсталација ЈО и замене постојећих NaVP светилки са ЛЕД светилкама. Може се констатовати да су се полазне претпоставке у изради ове дисертације показале као тачне и да се показало кроз више различитих мерења представљених у даљем тексту да ЛЕД извори заиста јесу боље решење од постојећих NaVP извора, и да представљају будућност јавног осветљења, прецизније, осветљења саобраћајница за моторни и мешовити саобраћај.

Да би се испитале бројне спекулације, непроверене тврдње из маркетиншких брошура и генерално читава фама која прати ЛЕД технологију, спроведено је обимно теренско истраживање које је имало за циљ да пружи одговор на нека од бројних питања. Постављена је тестна инсталација са NaVP и ЛЕД светилкама на којој су вршена различита електрична и фотометријска мерења, након којих је уследило и анкетно испитивање по питању субјективног доживљаја квалитета осветљења у обе зоне тестне инсталације, а на крају и економска анализа оправданости употребе ЛЕД извора у уличном осветљењу.

Као добар путоказ за дефинисање концепта оваквог компаративног истраживања послужили су фотометријски прорачуни који су рађени у циљу избора светилки одговарајућих карактеристика, како постојећих NaVP које су се морале репарирати (100 W уместо 150 W), тако и нових заменских ЛЕД светилки. Прорачуни су показали да је могуће задовољити исте фотометријске услове (светлотехничка класа М3) користећи ЛЕД светилке приближно 26 % мање инсталисане снаге од NaVP светилки (80 W наспрам 108.5 W). Посебно је интересантна чињеница да је ова компаративна предност остварена за најнеповољнији случај, тј. за радну струју од 1000 mA при којој је светлосна искористивост ЛЕД светилки најмања.

Табела 1. Фотометријске карактеристике светилке Voltana 3.

LED count	Colour code	Colour name	CCT (K)	CRI	Current (mA)	Luminaire power (W)	Source flux (lm)	Luminaire output flux (lm)	Luminaire efficacy (lm/W)	Peak (cd)	BUG Rating	Voltage (V)
Ambient temp = 25°												
24	WW	Warm White	3000	70	350	28	3480	3080	110	2376	B1 U0 G1	230
24	WW	Warm White	3000	70	500	41	4698	4158	101	3207	B2 U0 G1	230
24	WW	Warm White	3000	70	700	55	6194	5482	100	4229	B2 U0 G1	230
24	WW	Warm White	3000	70	1000	80	7760	6868	86	5298	B2 U0 G1	230
24	NW	Neutral White	4000	70	350	28	3552	3144	112	2425	B1 U0 G1	230
24	NW	Neutral White	4000	70	500	41	4795	4244	104	3274	B2 U0 G1	230
24	NW	Neutral White	4000	70	700	55	6323	5596	102	4316	B2 U0 G1	230
24	NW	Neutral White	4000	70	1000	80	7921	7010	88	5408	B2 U0 G1	230

Овде се може видети (коришћени тип је назначен у табели) да се са флуksom ЛЕД чипова светилке од 7.921 lm добија приближно једнак ниво сјајности коловоза као са NaVP светилком код које је флуks сијалице 10.700 lm. Фотометријски прорачуни доказују да је ефикасност ЛЕД светилки, контрола и расподела светлосног флуksа боља него код NaVP светилки, па се са 26 % мањим улазним флуksом извора добијају приближно једнаке фотометријске перформансе. Такође, занимљиво је приметити да је светлосна ефикасност ове ЛЕД светилке (88 lm/W) релативно мала у односу на неке очекиване вредности за квалитетне светилке (преко 100 lm/W), пре свега јер са повећањем радне струје пада светлосна ефикасност ЛЕД чипа (за друге струје изнад у табели (350/500/700 mA), та ефикасност је изнад 100 lm/W). У овом случају је направљен техно-економски баланс јер се са повећањем струје смањује број ЛЕД чипова на штампаној плочи, мањи број чипова подразумева мањи радни напон и последично јефтинији ЛЕД драјвер, мањи ЛЕД модул значи светилку мањих габарита, а све то заједно доноси јефтинију светилку задовољавајуће снаге и светлосног флуksа. Бољи резултати су се могли постићи да се користила светилка са већим бројем ЛЕД чипова са мањом радном струјом (за исту снагу би се добио барем 10-15 % већи светлосни флуks), али би и цена такве светилке била значајно виша што би утицало на економску оправданост инвестиције. Треба рећи и да је приложена табела дата за ЛЕД чипове генерације 2 јер је овај пројекат кренуо још пре скоро 2 године. Сада се у истим светилкама непромењених габарита (и цене) налазе ЛЕД чипови генерације 4 (4x4 mm²) који дају 10-15 % већи излазни флуks за исту радну струју.

Може се констатовати да висока светлосна ефикасност сама по себи није предност, као и да ЛЕД светилке могу парирати или чак дати и боље резултате од NaVP светилки уколико се одговарајућом оптиком оствари квалитетна контрола и

расподела светлосног флуksа. Треба наћи прави баланс између фотометријских и економских карактеристика за ЛЕД светиљке, али ови прорачуни недвосмислено показују да је ЛЕД технологија направила помак и да може успешно заменити NaVP светиљке и до 30-40 % већих снага.

Пре него што се изашло на терен, у фабрици су извршена мерења електричних и фотометријских карактеристика изабраних ЛЕД и NaVP светиљки, где се дошло до интересантног закључка: захваљујући димабилним електронским баластима и ЛЕД драјверима, снага светиљки се одржава приближно константном у широком опсегу улазног напона (код NaVP све до 170 VAC, а код ЛЕД и до 120 VAC). Ово је значајно имајући у виду да су флукутације мрежног напона прилично присутне у инсталацијама ЈО у Србији (постоје сазнања да се по ободним насељима града у инсталацијама ЈО често има напон од 180-200 VAC). Подсећања ради, промене напона од ± 5 % код натријумових извора високог притиска изазивају промене светлосног флуksа од ± 17 %.

Може се констатовати да електронски уређаји који подржавају рад у широком опсегу улазног напона могу бити од велике користи у мрежама са нестабилним напоном. Предност ЛЕД технологије лежи у томе да се такви ЛЕД драјвери подразумевају у стандардној изведби, док се у NaVP светиљкама углавном налази електромагнетска предспојна опрема што захтева додатна значајна улагања у прилагођење истих.

Ипак, треба рећи и да широк опсег улазног напона није увек предност, већ може представљати и значајан проблем о чему ће бити више речи у даљем тексту.

Други сет фабричких мерења је имао за циљ да одреди зависност односа светлосног флуksа и снаге од радне струје NaVP сијалице или ЛЕД модула (димовање извора). За натријумове изворе је одавно познато да светлосни флуks и снага не опадају у истом односу (флуks опада брже од снаге), док се за ЛЕД технологију тврди да су снага и светлосни флуks директно пропорционални са струјом и да опадају у истом односу. Мерења су ово и потврдила и дошло се до следећег закључка - док је при номиналним вредностима светлосног флуksа NaVP светиљка имала 23.53 % већу номиналну снагу, за ниво од нпр. 40 % светлосног флуksа снага NaVP светиљке је чак за 103.45 % већа од снаге ЛЕД светиљке.

Светлосни флуks код NaVP светиљки опада значајно брже него снага, док код ЛЕД светиљки светлосни флуks опада незнатно спорије него снага (овај однос је близак јединици). То значи да ће на нижим вредностима приликом димовања за добијање исте количине светлосног флуksа ЛЕД светиљкама требати пропорционално још мања снага него у номиналном режиму. Ово је значајна предност ЛЕД технологије јер се у раду са контролним системима (или програмабилним уређајима којима се може задати динамички сценарио рада) могу остварити додатне уштеде и до 50 % у зависности од дефинисаног динамичког сценарија рада инсталације.

Након постављања светиљки на тестну локацију, извршена су подешавања осветљења тако да у обе зоне (са NaVP или ЛЕД светиљкама) нивои сјајности буду идентични или готово идентични. Управо овај концепт приближно једнаких фотометријских услова представља највећи допринос ове дисертације, стварајући здраве основе за даља истраживања у овој области.

Иако је концепт једноставан, анализом расположиве стручне литературе која се бавила компаративном анализом ЛЕД и NaVP светилки, установљено је да је за све пронађене експерименталне поставке заједничко то да мерења нису рађена на основу приближно идентичних фотометријских услова (једнаких нивоа сјајности). Према сазнањима кандидата (уз додатне консултације и провере са еминентним стручњацима из области технике осветљења), може се констатовати да ово нису изоловани случајеви, већ да заправо не постоји стручна техничка (или техно-економска) анализа која истраживање базира на критеријуму експериментално подешених једнаких нивоа сјајности постојећих NaVP и новопостављених ЛЕД светилки. Изненађујућа је чињеница да је велики број истраживања у овој области рађен уз врло паушалне претпоставке о снагама ЛЕД светилки које замењују NaVP светилке, где је једини критеријум био да се смањи инсталисана снага на инсталацији. Такође, чак и ако су вршена фотометријска мерења, она су најчешће вршена према критеријуму осветљености што се може сматрати неадекватним приступом за инсталације уличног осветљења намењеног моторизованом или мешовитом саобраћају.

Подешавање фотометријских услова, које подразумева коришћење одговарајуће високо технолошке опреме, реализовано је у 3 корака:

- 1) фотометријским прорачунима су одређени типови NaVP и ЛЕД светилки који на саобраћајници задате геометрије дају приближно исте погонске нивое сјајности (почетни нивои сјајности су већи услед уважавања фактора одржавања),
- 2) извршена су мерења сјајности мобилним луминансметром и луксметром у циљу провере пројектованих вредности (овај процес је трајао неколико месеци док сви параметри нису били подешени на прави начин), и
- 3) удруженим радом контролног система имплементираног за читаву тестну инсталацију и мобилног луминансметра извршена је фина регулација фотометријских услова (након измереног нивоа сјајности у пољу вредновања, итеративним поступком се кроз систем даљинског управљања ниво сјајности (флуksа, радне струје) спуштао све до тренутка док није измерена жељена вредност средње сјајности на коловозу).

Битно је истаћи да се показало да рефлексиона својства коловоза не одговарају претпостављеној рефлексионој класи (R3007), већ да су измерени нивои сјајности виши од очекиваних почетних вредности, у ЛЕД зони чак и значајно виши. Након дужих испитивања (мерења сјајности и осветљености у различитим пољима вредновања, поновне провере нагиба светилки, мерења спектралне расподеле зрачења извора коришћењем спектрометра, промене оптичког блока и сијалица код NaVP светилки, прања коловоза у неколико наврата, провере исправности мерних уређаја...), установљено је да је коловоз таквих карактеристика да припада истој рефлексионој класи (R3008), али са вишим средњим коефицијентом сјајности.

Генерално, може се констатовати да коловозне површине (као нехомогене структуре) имају нехомогене рефлексионе карактеристике дуж истог пута, па је теоријске поставке веома тешко потврдити у пракси. Ипак, аутор сматра да би коришћење мобилних рефлектометара (или мерења рефлексионих карактеристика коловоза на неки други начин) требало да постане обавезна пракса у пројектовању инсталација ЈО, нарочито за саобраћајнице већег значаја. Уколико се оваква провера

не изврши, права рефлексиона класа коловоза може бити таква да возач перципира осетно више нивое сјајности (непотребно повећан трошак електричне енергије) или осетно ниже нивое сјајности од пројектованих (смањен видни комфор и угрожена безбедност у саобраћају).

Мерења електричних величина су вршена паралелно са 3 различита типа уређаја или система: вредности очитане у бежичним контролерима светилки и расположиве на корисничкој страници телеменаџмент система, вредности очитане са дигиталних бројила инсталираних у орман ЈО и вредности очитане мрежним анализатором за све режиме рада (најпре фиксне режиме где је сваки од дефинисаних нивоа сјајности био константан током ноћних сати, а затим и мешовите режиме где су креирани одговарајући динамички сценарији рада инсталације у којима се ниво сјајности мења од номиналног ка најнижем дефинисаном током ноћних сати у одређеним временским интервалима). Мерења кроз телеменаџмент систем и кроз дигитална бројила су вршена 9 месеци, док је мрежни анализатор само послужио да се испитају хармонијска изобличења напона и струје (очитани су и сви остали електрични параметри ради даљег поређења са осталим мерним системима). Дефинисано је неколико стандардних режима рада и неколико режима са уважавањем ефеката мезопског виђења. На основу великог броја мерења у периоду август 2015 - април 2016, сређене су вредности свих мерених и израчунатих електричних параметата (U , I , $\cos\varphi$, P , Q , W_a , W_r) за сваки од дефинисаних фотопских и мезопских режима рада. Најпре су анализиране вредности добијене кроз телеменаџмент систем, имајући у виду да су контролери светилки опремљени мерним колима високе класе тачности.

1. Закључено је да:

- за постизање истих референтних фотопских нивоа сјајности од 1.346 cd/m^2 потребне су ЛЕД светилке инсталисане снаге мање за 30.8 %,
- због особине ЛЕД светилки да са димовањем снага опада брже од светлосног флукса, за сваки нижи фотопски режим потребна снага ЛЕД светилки је пропорционално још мања у односу на одговарајуће снаге NaVP светилки - 41.07 % за ниво сјајности 1 cd/m^2 , 49.75 % за ниво сјајности 0.75 cd/m^2 и 62.74 % за ниво сјајности 0.5 cd/m^2 ,
- за мезопске нивое сјајности ове разлике у инсталисаној снази су још веће - 53.62 % за ниво сјајности 0.86 cd/m^2 , 61.36 % за ниво сјајности 0.63 cd/m^2 и 69.3 % за ниво сјајности 0.4 cd/m^2 ,
- са обарањем нивоа сјајности (снаге и светлосног флукса), фактор снаге код NaVP светилки се веома мало мења (опада) – од 0.99 за ниво сјајности 1.346 cd/m^2 до 0.96 за ниво сјајности 0.5 cd/m^2 ,
- са обарањем нивоа сјајности (снаге и светлосног флукса), фактор снаге код ЛЕД светилки драстично опада - од 0.95 за ниво сјајности 1.346 cd/m^2 до 0.73 за ниво сјајности 0.5 cd/m^2 , и
- за мезопске нивое сјајности фактор снаге код ЛЕД светилки још драстичније опада - од 0.88 за ниво сјајности 0.86 cd/m^2 до 0.64 за ниво сјајности 0.4 cd/m^2 .

Поредећи ове вредности са оним очитаним кроз дигитална бројила, установљено је да се апсолутне вредности снага мерених кроз телеменаџмент и путем дигиталних бројила разликују 2.9 % код ЛЕД и 0.75 % код NaVP светиљки, док се фактор снаге разликује 4.15 % код ЛЕД и 1.59 % код NaVP светиљки. Такође, поредећи потрошњу активне енергије, може се констатовати да су разлике у овом дужем временском периоду су у просеку мање од 5 %.

Будући да предметно истраживање није имало за циљ само да прикаже компаративну анализу NaVP и ЛЕД светиљки, већ и да анализира ефекте имплементације система даљинског управљања у инсталацијама ЈО, може се констатовати да телеменаџмент систем представља изванредно решење за контролу и надзор уличног осветљења, доносећи велике уштеде у потрошњи електричне енергије, али и повратне информације о раду и статусу сваке од појединачних светиљки (укључујући и укупне сате рада), што може довести да значајно лакшег одржавања ових инсталација. Такође, имајући у виду да се мерене електричне величине незнатно разликују од оних измерених кроз дигитална бројила која представљају стандардно решење за ову намену, треба размотрити и мерну функцију оваквих система која би донела даље инвестиционе уштеде и учинила постављање додатних бројила непотребним.

Ако се овим резултатима придодају и резултати мерења мрежним анализатором, добија се следећа табеле упоредних вредности активних снага и фактора снаге из којих произлазе и све остале електричне величине. Ако се дигитална бројила узму као референтни мерни систем (што јесте тренутна реалност), може се констатовати да вредности очитане кроз телеменаџмент систем и мрежни анализатор не одступају више од 5 % од референтних вредности.

Табела 2. Компаративна табела мерених електричних величина кроз 3 мерна система

1		TELEMENADŽMENT			
		LED		HID	
REŽIMI RADA (LED→HID)		P [W]	cosφ	P [W]	cosφ
1.346 cd/m ²	1.346 cd/m ²	436.86	0.95	946.89	0.99
1 cd/m ²	1 cd/m ²	300.9	0.91	765.9	0.98
0.86 cd/m ²	1 cd/m ²	237.48	0.88	767.97	0.98
0.75 cd/m ²	0.75 cd/m ²	212.7	0.86	634.95	0.98
0.63 cd/m ²	0.75 cd/m ²	163.8	0.81	635.94	0.97
0.5 cd/m ²	0.5 cd/m ²	126.42	0.73	508.95	0.96
0.4 cd/m ²	0.5 cd/m ²	104.16	0.64	508.95	0.96
2		DIGITALNA BROJILA			
		LED		HID	
REŽIMI RADA (LED→HID)		P [W]	cosφ	P [W]	cosφ
1.346 cd/m ²	1.346 cd/m ²	440	0.94	960	1.00
1 cd/m ²	1 cd/m ²	300	0.90	770	1.00
0.86 cd/m ²	1 cd/m ²	240	0.87	780	0.99
0.75 cd/m ²	0.75 cd/m ²	200	0.83	640	0.99
0.63 cd/m ²	0.75 cd/m ²	160	0.78	640	0.99
0.5 cd/m ²	0.5 cd/m ²	120	0.70	510	0.98
0.4 cd/m ²	0.5 cd/m ²	100	0.61	510	0.98
3		MREŽNI ANALIZATOR			
		LED		HID	
REŽIMI RADA (LED→HID)		P [W]	cosφ	P [W]	cosφ
1.346 cd/m ²	1.346 cd/m ²	433	0.92	974	0.99
1 cd/m ²	1 cd/m ²	294.5	0.87	788.5	0.98
0.86 cd/m ²	1 cd/m ²	233.5	0.84	786.5	0.98
0.75 cd/m ²	0.75 cd/m ²	196.5	0.79	654	0.97
0.63 cd/m ²	0.75 cd/m ²	159	0.76	652	0.98
0.5 cd/m ²	0.5 cd/m ²	123	0.67	523	0.97
0.4 cd/m ²	0.5 cd/m ²	98.5	0.59	523.5	0.97

Ипак, од већег значаја за предметну анализу су мешовити режими рада јер улагање средстава у постављање телеменаџмент система има смисла само уколико су предвиђене промене нивоа сјајности током ноћи. Због тога су, а користећи вредности електричних величина измерених кроз дигитална бројила, дефинисани стандардни и мезопски сценарији рада инсталације ЈО на годишњем нивоу. Ово ће бити прави показатељ могућих уштеда јер су сва мерења вршена у периоду краћем од календарске године што није довољно да се има комплетна слика, будући да се дужина ноћи и број сати укључења инсталације ЈО мења током године у широком распону од 9h до 15h. За ову сврху је искоришћен календар годишњих укључења/искључења светиљки добијен од ЈКП „Јавно осветљење“. Ова компаративна анализа годишње потрошње електричне енергије заснована је на претпостављеним режимима рада који се реално могу применити у уличном осветљењу и употпунила је један општи закључак који представља резултат свих претходно анализираних електричних мерења:

- ЛЕД светиљке су ефикасно решење за инсталације ЈО. Оне доносе уштеде у инсталисаној номиналној снази (а последично и потрошњи електричне енергије) од око 30 % у односу на NaVP светиљке, уз уважавање критеријума једнаких фотометријских услова,

- за стандардне (фотопске) динамичке режиме рада, потрошња активне енергије је за приближно 50 % мања, а потрошња реактивне енергије за приближно 50 % већа него код NaVP светиљки на годишњем нивоу,

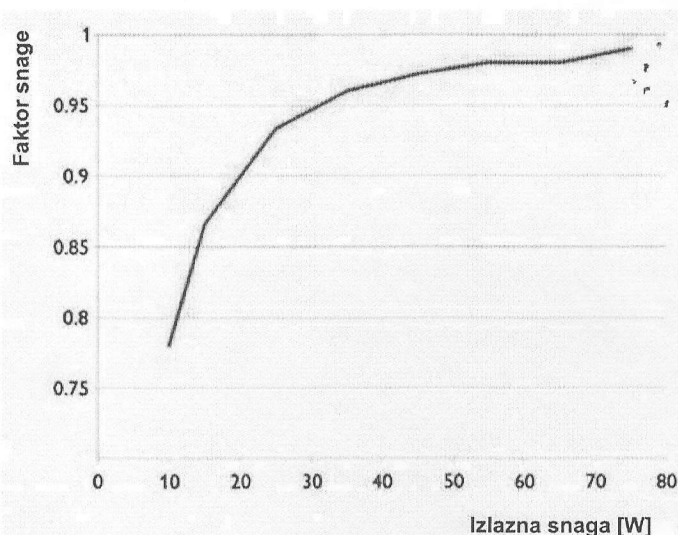
- са уважавањем мезопских ефеката потрошња активне енергије се смањује за додатних 20 % (повећање потрошње реактивне енергије је 3 %) у односу на стандардне динамичке режиме са ЛЕД светиљкама, што наводи на закључак да уважавање мезопских ефеката може бити значајан чинилац у пројектовању инсталација ЈО,

- због значајног опадања фактора снаге код ЛЕД светиљки, проблем се мора разматрати и са аспекта одржања квалитета електричне енергије – компензација реактивне енергије није ефикасна за ниже режиме рада, и

- низак фактор снаге доводи у питање суштинску предност ЛЕД технологије да се ти извори могу димовати чак до 10 % номиналног светлосног флуksа. Та компаративна предност није од значаја уколико то истовремено подразумева фактор снаге ближи вредности 0.5 него 0.9.

Фактор снаге је као величина директно повезан са присуством хармоника у мрежи, те стога не изненађује чињеница да су мерења хармонијских изобличења мрежним анализатором за све стандардне и мезопске режиме рада показала да ЛЕД светиљке у готово свим случајевима не испуњавају услове прописане одговарајућим стандардима (максимално дозвољене вредности THD напона и струје, као и лимите за сваки хармоник до 40-ог реда). Истовремено, NaVP светиљке, код којих се висок фактор снаге одржава кроз све режиме, немају проблем са прекомерним присуством виших хармоника. За аутора је питање фактора снаге било од посебног интереса јер је било тешко пронаћи стручну литературу која би дала објашњење зашто постоји таква разлика између електронских баласта и ЛЕД драјвера по овом питању. Наизглед, ова два уређаја заснована на прекидачкој (SMPS) технологији имају слично конструктивно решење у делу кола где се регулише излазна вредност напона или струје. Највећа дилема је била да ли је ова слабост ЛЕД драјвера последица одређених техничких ограничења која не дозвољавају да се направи ефикасан уређај кроз читав оперативни опсег, или је такво решење економски неприхватљиво због већег броја електролитских кондензатора који би повећали цену и габарит, а смањили поузданост због краћег животног века. Даља истраживања су показала да су оба разлога једнако утицала на садашњу архитектуру ових уређаја. Главни разлог за низак фактор снаге лежи у широком опсегу улазног напона код ЛЕД драјвера, али истовремено и у широком опсегу излазних напона и струја. Веома је тешко конструисати уређај који може да одржи вредност фактора снаге у тако широком оперативном опсегу. Ипак, може се приметити да је опсег улазног напона код електронских баласта доста ужи (208-277 VAC) него код ЛЕД драјвера (120-277 VAC), па се и ту крије један од разлога зашто је електронски баласт ефикаснији по том питању. Детаљније објашњење за низак фактор снаге и појаву хармоника је дато у поглављу 5.5. Поставља се питање оправданости имплементације телеменаџмент система са ЛЕД светиљкама уколико се не може гарантовати висок фактор снаге кроз највећи део оперативног опсега. Можда су размишљања ишла и у смеру да ЛЕД светиљке које су мањих снага од NaVP светиљки и не треба димовати на мање од 50 %, а до те вредности је фактор снаге и даље већи од 0.9. Ипак, дошло се до сазнања

да ће и овај проблем веома брзо бити превазиђен – као што је у претходним годинама стратешка одлука највећих произвођача била да нуде мањи број типова који могу радити у широком оперативном опсега са осредњим перформансама, нови глобални тренд је да се нуди широк асортиман производа уже примене, али високих перформанси. У току је развој нових ЛЕД драјвера намењених искључиво европском тржишту код свих већих произвођача, а који ће радити у уском опсегу улазног напона 220-240 VAC. У том случају, биће могуће одржати висок фактор снаге изнад 0.9 чак и до 20 % номиналне снаге (слика 1 је део поверљивог документа једног од водећих произвођача ЛЕД компоненти и односи се на ЛЕД драјвер снаге 75 W).



Слика 1. Зависност фактора снаге од излазне снаге за ЛЕД драјвере који раде у опсегу улазног напона 220-240 VAC

Анкетно испитивање (са 66 испитаника) је спроведено у циљу да се објективни инжењерски приступ употпуни субјективним доживљајем квалитета осветљења, јер се само кроз оба ова приступа може доћи до правог одговора о оправданости реконструкције ЈО и квалитету разматраних ЛЕД извора светлости као технологије будућности. Два режима за које је вршено анкетно испитивање дала су опречне закључке – док је у стандардном режиму ЛЕД инсталација оцењена као боље решење од стране већине испитаника по већем броју питања релевантних за истраживање (сем непријатног бљештања за возача и уочавања пешака поред пута), дотле је у мезопском режиму рада инсталација са NaVP оцењена као прави избор (са изузетком боје светлости и бљештања које је субјективно (неочекивано) доживљено као мање са незнатним димовањем ЛЕД светиљки (само 14%). Према конкретном анкетном испитивању, разлика у одговорима који се односе на два режима рада инсталације говори о томе да теорија мезопског виђења још није у довољној мери испитана и потврђена, јер је очигледно да није постојао утицај мезопских ефеката на испитанике који су оценили део инсталације са ЛЕД светиљкама као слабије осветљен. Иако је ЛЕД инсталација тек незнатно димована (14% мањи светлосни флуks), ова разлика је примећена. Треба узети у обзир и замор испитаника јер је анкета била конципирана тако да мезопски режим долази после номиналног режима, имајући у виду да је већи број испитаника учествовао у анкетирању за оба режима.

Може се закључити да је у номиналним условима инсталација са ЛЕД светилкама оцењена као боље решење, док је у мезопским условима као боља оцењена постојећа инсталација са NaVP светилкама.

Економско поређење фотометријских решења са NaVP и ЛЕД светилкама је остављено за крај овог истраживања и засновано је на општеприхваћеној методи актуелизације трошкова. Разматрају се укупни трошкови унутар истог амортизационог периода од 10 (5) година, који укључују како иницијалне (инвестиционе), тако и експлоатационе трошкове. Економска анализа је третирала 4 случаја – исплативост замене постојећих NaVP светилки са новопроектованим ЛЕД светилкама, и то без и са имплементираним системом телеменаџмента за два различита тренутка замене постојећих NaVP светилки (након 10 или 15 година експлоатације). Показало се да оваква инвестиција није економски оправдана за експлоатациони циклус од 10 година, а за експлоатациони циклус од 5 година анализа није ни рађена јер би добијени резултати могли бити само гори.

Извршена је још једна анализа – повећавана је цена електричне енергије не би ли се установило која би то вредност учинила да оваква реконструкција буде економски оправдана. Установљено је да цена електричне енергије од 23 дин/kWh (постојећа цена 9.907 дин/kWh) у најнеповољнијем случају за стопу актуелизације 7.5 % без система телеменаџмента довољна да би се таква инвестиција исплатила. Треба имати у виду да је цена електричне енергије у Србији ниска и да се очекује пораст у наредних 5-10 година, као и чињеницу да ће цене ЛЕД светилки још падати (не драстично, али сигурно до 20 %).

Имајући све то у виду, а узевши у обзир и чињеницу да се са реконструкцијама ЈО у Србији највероватније неће кренути још барем 5 година због тешке економске ситуације (највећи део реконструкција ЈО извршен је до 2008. године, пре светске економске кризе), може се претпоставити да, уколико би се у реконструкције ЈО на нивоу градова кренуло за 5 година, ЛЕД светилке буду боље решење и са економског аспекта.

Сагледавајући резултате ове обимне анализе, може се закључити да ЛЕД извори заиста представљају будућност уличног осветљења, и то не са маркетиншког аспекта, већ готово по свим техничким и економским параметрима. Остаје отворено питање термичког дизајна светилки, јер је висока температура која се генерише на ПН споју ЛЕД чипа један од највећих проблема са којим се сусреће ЛЕД технологија (као уосталом и сва електронска опрема). Ипак, код реномираних произвођача је сваки производ покривен одговарајућим тестним извештајима, међу којима је и термички тест који гарантује функционалност производа у одређеном опсегу температура амбијента који се мора поштовати. Друго питање је питање високог удела плаве компоненте у спектру ЛЕД извора што може бити штетно по здравље грађана, али су у анализи коришћене ЛЕД светилке са изворима неутралне беле боје (температуре боје 4000K) које имају повољнији спектар зрачења и смањен удео плаве компоненте у односу на ЛЕД изворе хладне боје светлости. Треће питање је питање непријатног бљештања које је директна последица минијатурних извора светлости који са мале површине израчују већу количину светлости. Овим питањем се бави и конзорцијум произвођача ЛЕД светлосне опреме „Zhaga“ 99, који промовише ЛЕД изворе већих површина чиме би се значајно смањило бљештање и „ублажила“ светлосна расподела (не би више било оштрих одсецања светлосне

карактеристике чија је последица слабије сагледавање окружење пута, што возачи сматрају непријатним). Такође, Zhaga конзорцијум инсистира на развоју алуминијумских рефлектора (одсијача) за ЛЕД модуле наспрот сада најраспрострањенијој примени РММА сочива за сваки ЛЕД чип, чиме се и ЛЕД технологија враћа на стари концепт - један извор светлости + рефлектор.

5. ЗАКЉУЧАК И ПРЕДЛОГ

На основу извршеног увида у докторску дисертацију мр Андреја Ђуретића, комисија сматра да дисертација садржи оригиналне научне доприносе који се односе на изузетно актуелну област нових технологија и њихових примена у светлосној техници. На основу спроведених истраживања и испитивања може се закључити да ЛЕД технологија с правом представља озбиљног претендента на место најдоминантнијег извора у уличном осветљењу у блиској будућности, и то по свим техничким показатељима обрађеним у докторској дисертацији. Ако се претпостави да ће питање ниског фактора снаге (и хармонијских изобличења) у режимима димовања бити решено са новом генерацијом ЛЕД драјвера, а имајући у виду и објективне тржишне околности где се желе вратити огромна средства уложена у развој ЛЕД технологије у најкраћем временском року, аутор је мишљења да не постоје објективне препреке да ЛЕД светиљке (оправдано) постану доминантне и у инсталацијама ЈО у Србији, а врло вероватно и системи даљинског управљања и надзора.

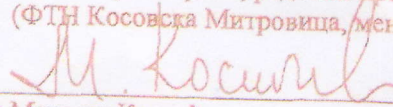
С обзиром на горе речено и остварене резултате, чланови комисије предлажу Наставно-научном већу Факултета техничких наука у Косовској Митровици да прихвати оцену комисије о писаном делу дисертације под насловом "Техно-економска анализа светлосних извора у инсталацијама јавног осветљења као основ за одређивање оправданости замене натријумових сијалица високог притиска ЛЕД изворима" и да кандидату мр Андреју Ђуретићу одобри усмену одбрану.

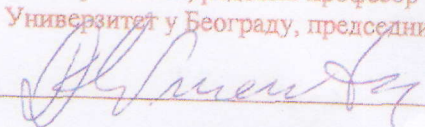
Такође, потписници овог извештаја предлажу ННВ-у да комисију за усмену одбрану буде у истом саставу као и комисија за писање извештаја о урађеној докторској дисертацији.

Косовска Митровица, 04.07.2016.

ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ


др Небојша Арсић, редовни професор
(ФТН Косовска Митровица, ментор)


др Миомир Костић, редовни професор
(Електротехнички факултет, Универзитет у Београду, председник)


др Дардан Климента, ванредни професор
(ФТН Косовска Митровица, члан)