

Једно решење IoT система за испитивање утицаја вештачког осветљења на човекову продуктивност

IoT System for Investigating the Impact of Artificial Lighting on Human Productivity

Павле Вуковић, Факултет техничких наука, Нови Сад

Област – РАЧУНАРСКА ТЕХНИКА И РАЧУНАРСКЕ КОМУНИКАЦИЈЕ

Кратак садржај – Циљ рада је дизајн и реализација IoT система за контролу осветљења у затвореном простору који отклања ограничења решења коришћених у научним истраживањима. На основу прегледа литературе потврђен је утицај светлости на продуктивност и здравље и идентификовани су недостаци постојећих система. Као основа система је изабран софтвер паметне куће. Он је потом проширен имплементацијом дефинисане паметне логике. Систем је пројектован, реализован и тестиран према унапред задатим критеријумима, при чему резултати показују да их у потпуности испуњава и да успешно превазилази уочене мане. Главно ограничење је скалабилност: тренутна верзија је погодна за мање просторе, док је за примену у великим постројењима потребно даље скалирање.

Кључне речи: IoT, вештачко осветљење, продуктивност, циркадијални ритам, Home Assistant

Abstract – The aim of this thesis is the design and implementation of an IoT system for indoor lighting control that overcomes the limitations of solutions currently used in scientific research. Based on a literature review, the impact of light on human productivity and health is confirmed and shortcomings of existing systems are identified. The system is built on a smart home software platform and extended through the implementation of defined smart logic. The system was designed, implemented and tested against predefined criteria and the results show that it fully meets these criteria and successfully addresses the shortcomings of existing systems. The main limitation of the current solution is scalability: current solution is appropriate for small indoor spaces. It requires scaling to be applicable in industrial environments.

Keywords: IoT, artificial lighting, productivity, circadian rhythm, Home Assistant

НАПОМЕНА: Овај рад проистекао је из мастер рада чија менторка је била др Јелена Ковачевић, ванр. проф.

1. УВОД

Многа научна истраживања су показала несумњиви утицај осветљења на продуктивност и здравље човека.

Анализом такве научне литературе уочене су значајне мане система осветљења коришћених у експериментима. Ти системи најчешће захтевају сложену инсталацију и употребу, не омогућавају брзу и лаку промену својстава параметара осветљења и имају ограничен или непостојећи степен аутоматизације. Поред тога, инсталације су углавном фиксне и не пружају флексибилност у погледу промене распореда извора светлости у просторији [2–9]. Мотив овог рада је дизајн и реализација бесплатног IoT система за контролу осветљења у затвореном простору који елиминише наведена ограничења. Предложени систем није намењен искључиво научним истраживањима, већ има примену и у домаћинствима, као и у пословним и индустријским окружењима.

У центру предложеног система се налази већ готов софтвер паметне куће. Будући да на тржишту већ постоји велики број решења који омогућавају услуге паметне куће, имплементација оваког софтвера није оправдана. Након анализе могућности које нуде водећа решења, као основа система је изабран Home Assistant. Почетни софтвер се проширује имплементацијом паметне логике која дефинише аутоматизације осветљења. Логика је дефинисана у складу са научном литературом. Дефинисани су и критеријуми које систем мора да испуни, након чега је реализовани систем тестиран како би се утврдило да ли и у којој мери задовољава постављене критеријуме.

2. ТЕОРИЈСКЕ ОСНОВЕ

2.1. IoT системи

IoT обухвата међусобно повезане уређаје који аутономно размењују податке и управљају системом. Најчешће се разликују системи паметних кућа и индустријски IoT. Типичан IoT систем чине централни уређај, сензори, актуатори, корисничка спрега и, по потреби, облак за сложенију обраду података.

Паметне куће

Системи паметних кућа примењују се у стамбеним просторима и заснивају се углавном на „лаким“ бежичним комуникационим протоколима и технологијама (MQTT, Zigbee, Z-Wave, BLE, Wi-Fi, Matter). Они поједностављују интеграцију уређаја уз релативно ниску цену и довољну поузданост за сценарије где временски одзив није критичан. На

тржишту постоји више платформи које пружају услуге софтвера паметне куће.

Индустријски IoT

Индустријски IoT се примењује у индустријским и пословним окружењима где су поузданост, сигурност и рад у реалном времену од кључног значаја. Због тога се најчешће користе комуникациони протоколи засновани на Ethernet протоколу. Системи су скупљи, ажурирања ретка, а свака инсталација је прилагођена конкретної примени, тј. нема универзалних готових решења.

2.2. Избор софтвера

У оквиру рада се не развија потпуно ново решење, већ се врши избор и надограђује већ постојећи софтвер паметне куће. На тржишту постоји неколицина таквих софтвера: Home Assistant, SmartThings, Amazon Alexa, Google Home, Apple HomeKit и на десетине других. Изабрани софтвер мора да буде: бесплатан, подржава велики број модерних комуникационих протокола и уређаја, нуди механизме аутоматизације, има активну заједницу и често се ажурира. Једини који је испунио све критеријуме је Home Assistant. Поред наведених захтева, он нуди и неке додатне алате о којима ће бити речи у даљем току рада.

2.3. Параметри светлости

Фотометрија проучава светлост у односу на људско око и дефинише, између осталог, следеће физичке величине везане за интензитет светлости: количину светлости, светлосни флукс (лумен), јачину светлости (кандела), луминацију и осветљеност (луке). За боју светлости, то су: температура боје (CCT), у Келвинима, која описује да ли је светло „топло“ или „хладно“ и генерални индекс рендеровања боје (CRI), који указује на веродостојност приказа боја [8]. Видљиви спектар је део електромагнетног спектра који је видљив голим оком. Типично људско око реагује на таласне дужине од 380 до 740 nm.

2.4. Циркадијани ритам

Циркадијални ритмови регулишу циклусе будности и сна, метаболизам и друге физиолошке процесе. Главни „сат“, који координише све ове процесе се налази у супракијазматичном нуклеусу (SCN) у хипоталамусу, а информације о светлу добија путем специјализованих ћелија у ретини ока (ipRGC), осетљивих на светлост. Светлост преко ipRGC утиче на лучење кортизола и мелатонина: кортизол је повишен ујутру и подстиче будност, док мелатонин расте увече и припрема организам за сан. Одређени светлосни услови могу померити фазу циркадијалног ритма унапред или уназад. [1][9][10].

3. ПРЕГЛЕД НАУЧНЕ ЛИТАРАТУРЕ

Жеља је да се уоче карактеристике светлосних система коришћених у досадашњим истраживањима како би се уочиле њихове мане које ће потом бити отклоњене. Такође, сагледава се утицај светлости на продуктивност и здравље човека и идентификују захтеви за дизајн паметне логике. Претрага је извршена путем сервиса Google Scholar, коришћењем

комбинација кључних речи light + productivity и light + circadian rhythm.

Анализа светлосних система коришћених у истраживањима показује да они имају бројна ограничења [2–9]:

- сложену поставку и употребу;
- потребу за техничком подршком;
- ограничене могућности брзе промене својстава осветљења;
- доминацију флуоресцентних лампи као извора светлости;
- употребу застарелих или тешко управљивих технологија;
- фиксне инсталације које је тешко премештати током студије.

Предложени систем је дизајниран тако да адресира све наведене недостатке.

Када је реч о утицају светла на продуктивност и здравље човека, изведени су следећи закључци [1–10]:

- светлост јаког интензитета побољшава продуктивност;
- аутономија корисника у контроли светла на радном месту је важна;
- на продуктивност утиче више међусобно повезаних фактора па је тешко изоловати појединачне утицаје;
- LED извори светла су пожељнији од флуоресцентних;
- важно је да светло испуњава очекивања корисника;
- ноћу се препоручују нижи нивои осветљености како би се ублажио негативан акутни утицај светла на сан;
- изложеност светлу може значајно да помери фазу циркадијалног ритма, унапред или уназад, а циркадијални поремећаји су повезани са више негативних последица по здравље, посебно код ноћних радника;
- квалитетан светлосни систем треба да обезбеди довољну осветљеност за визуелне задатке, добру униформност и балансирану дистрибуцију светла у простору, минималан одсјај, добар индекс рендеровања боје и одсуство треперења.

Ови закључци ће бити коришћени за дефинисање паметне логике чијом се имплементацијом демонстрира функционалности реализованог система.

4. КОНЦЕПТ СИСТЕМА

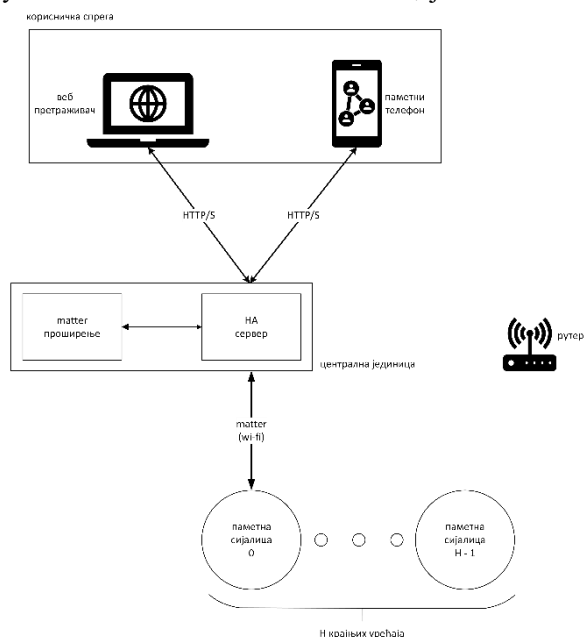
Слика 1 приказује концепт система. Систем чине:

- корисничка спрега (рачунар, паметни телефон и сл.) - спона корисника и система;
- централни уређај – повезује све компоненте и извршава логику система;
- крајњи уређаји (паметне сијалице, Moes MWB-TDA9) - сензорски и актуаторски уређаји;
- рутер - обезбеђује локалну мрежу и омогућава комуникацију у систему.

4.1. Корисничка спрега

То је спона корисника и система. Може јој се приступити преко веб претраживача или кроз

наменску апликацију за паметни телефон. Кроз њу је могуће додавати уређаје, посматрати њихова стања, ручно управљати стањима уређаја и имплементирати аутоматизације. Паметни телефон има додатну улогу у иницијалном повезивању паметних сијалица у систем, путем наменске НА мобилне апликације.



Слика 1. Концепт система

4.2. Централни уређај

Централни уређај је Raspberry Pi 4 Model B са Ubuntu Linux оперативним системом. Home Assistant сервер се извршава у Docker окружењу и комуницира са корисничком спрегом преко HTTP(S) протокола. Са крајњим уређајима комуницира путем Matter протокола, док се подржавају и други уобичајени комуникациони протоколи, што омогућава једноставно проширење система. Подршку за Matter комуникациони протокол обезбеђује Matter проширење НА сервера, које се такође извршава у Docker окружењу.

4.3. Крајњи уређаји

Крајњи уређаји су паметне сијалице које истовремено имају улогу и сензора и актуатора. Могуће је читати и мењати њихова својства (интензитет, боја и температура светла), било ручно, преко интерфејса или аутоматски, на основу дефинисане паметне логике. Сијалице се у систем повезују уз помоћ паметног телефона који преко BLE везе преноси податке о Wi-Fi мрежи на коју је потребно да се повежу. Након иницијалног повезивања, даља комуникација се одвија између централног уређаја и сијалица путем Matter протокола. У систему су коришћене сијалице: Mues MWB-TDA9. У ову сврху је могуће користити и сијалице које користе друге популарне протоколе, нпр. Zigbee.

4.4. Критеријуми исправности система

Систем се сматра исправним ако су испуњени следећи критеријуми:

- робусност – систем мора стабилно да ради током дужег периода без прекида;
- преносивост и лакоћа подешавања – инсталација и конфигурација морају бити довољно једноставни да их могу обављати и корисници без техничке позадине (нпр. истраживачи).
- исправност крајњих уређаја – својства паметних сијалица морају се тачно читати и мењати, а временски одзив при промени стања треба да буде реда величине једне секунде како би се очувао добар кориснички доживљај.
- исправност паметне логике – све дефинисане аутоматизације морају се извршавати у складу са спецификацијом и на очекиван начин.

Систем такође треба да реши све проблеме које имају тренутно коришћени системи, о којима је било речи у поглављу 1. Испуњеност ових критеријума проверава се у поглављу посвећеном тестирању система.

5. ПОСТАВКА СИСТЕМА

Иницијална поставка обухвата следеће кораке:

- инсталацију Ubuntu OC на Raspberry Pi и његово повезивање на локалну мрежу;
- омогућавање даљинског приступа уређају путем SSH-а, како би се даљи приступ обављао са персоналног рачунара;
- доделу статичке IP адресе Raspberry Pi уређају, ради поузданог приступа;
- инсталацију Docker и Docker Compose алата;
- покретање Docker контејнера: Home Assistant сервера и Matter интеграције као проширења за подршку Matter протоколу;
- приступ НА веб интерфејсу и пролазак кроз кратку иницијалну конфигурацију.

6. ИМПЛЕМЕНТАЦИЈА СИСТЕМА

Дефинисана су два режима рада у којима је могуће манипулисати осветљењем:

- кориснички режим – мануелна контрола својстава сијалица;
- аутоматски режим – аутоматска контрола на основу паметне логике.

6.1. Кориснички режим

Када су паметне сијалице интегрисане у НА окружење, корисник добија могућност директне контроле њихових својстава преко корисничке спреге. Из основног приказа могуће је укључивање и искључивање појединачних сијалица или група, док детаљнији приказ омогућава:

- подешавање параметара светлости;
- увид у мета-податке и историју промена.

Према [2], аутономија корисника у подешавању осветљења значајно утиче на задовољство и перформансе, па систем задржава пун мануелни режим као важну компоненту. НА интерфејс је високо конфигурабилан, те је могуће дефинисати своје верзије приказа постојећих стања паметних сијалица. У овом раду се користи подразумевани приказ који је био довољан за демонстрацију функционалности.

6.2. Аутоматски режим

У аутоматском режиму НА самостално управља паметним сијалицама на основу унапред дефинисане паметне логике. За то се могу користити НА алати:

- аутоматизације;
- сцене;
- скрипте.

Након евалуације алата, аутоматизације су се показале као најпотпунија опција. Свака аутоматизација има следеће елементе:

- окидач – догађај који покреће аутоматизацију;
- услов – логички услов који мора бити испуњен да би се акција извршила;
- акција – низ корака који мењају стање уређаја.

Свака аутоматизација је скрипт фајл у .yaml формату, написан у складу са НА документацијом. Аутоматизације је могуће креирати на неколико начина, а изабрано је да се то врши на следећа два начина.

- за лице без техничког знања - кроз кориснички спрегу НА окружења изабрати Подешавање → Аутоматизације и сцене → Креирај нову аутоматизацију. Корисник добија једноставан мени чијим праћењем може креирати једноставне аутоматизације. Овај приступ је веома једноставан, али нуди ограничене могућности аутоматизација.
- за лице са техничким знањем – Кроз кориснички спрегу НА окружења изабрати Подешавање → Аутоматизације и сцене → Креирај нову аутоматизацију → ... → Измени у YAML. Сада се добија могућност креирања аутоматизације у .yaml формату. Овај приступ нуди све функционалности које аутоматизације нуде. С друге стране, компликован је и захтева техничко знање.

За потребе рада, дефинисане су и имплементиране следеће паметне логике:

Аутоматизација буђења

Непосредно пре времена буђења (нпр. тридесет минута), интензитет светла у спаваћој соби се постепено повећава од минималне до жељене вредности, симулирајући излазак сунца. На тај начин се ублажавају негативни ефекти наглог буђења алармом и приближава природни начин буђења. Овим се комбинују добре карактеристике спавања у потпуно замраченој просторији [10] и „природног“ буђења, без аларма.

Аутоматизација рада

НА је повезан са Google календаром корисника. То је могуће коришћењем Google календар интеграције за НА. Када у календару почне догађај који означава време за рад (нпр. садржи кључну реч „work“ у наслову), светло у радном простору се поставља на висок интензитет погодан за повећање продуктивности [1][2]. По завршетку догађаја, светло се враћа у основно стање.

Аутоматизација припреме за сан

Неколико сати пре спавања, систем аутоматски смањује интензитет осветљења и подешава топлију температуру боје у животној простору, а у време

одласка на спавање искључује светла. Овим се смањују акутни негативни утицаји јаког светла у сатима пре спавања [9][10].

Поред ових аутоматизација, корисник, нпр. истраживач може лако дефинисати своје аутоматизације, те не мора мануелно мењати стања извора светлости током свог експеримента, већ се то може вршити аутоматизовано.

6.3. Коришћење постојеће конфигурације

Како би систем био лакши за коришћење код корисника без техничке позадине (нпр. истраживача), могуће је коришћење већ припремљене конфигурације НА окружења. НА омогућава креирање резервне копије која садржи:

- дефинисане аутоматизације;
- упарене уређаје;
- интеграције (нпр. Matter, Google календар);
- подешене изгледе картица и др.

Ову архиву је могуће учитати при поставци новог система, чиме се добија већ конфигурисано окружење. Након тога је потребно само поново упарити физичке уређаје (нпр. паметне сијалице) и, по потреби, поново одобрити поједине интеграције. На тај начин се знатно скраћује време поставке и смањује потреба за техничком подршком.

7. ТЕСТИРАЊЕ СИСТЕМА

Следи низ тестова спроведених над системом ради провере испуњености критеријума дефинисаних у одељку 4.4.

Тест робустности система

Централни уређај био је под непрекидним напоном и у продукционом режиму рада током периода од више недеља, односно месеци. За то време систем није бележио прекиде у раду нити неочекивано понашање. Овим је систем прошао стрес-тест дуготрајног рада и потврдио довољан ниво робустности за планирану примену.

Тест преносивости и лакоће подешавања система

Преносивост система и лакоћа подешавања проверени су коришћењем механизма резервних копија. Полазећи од ручно конфигурисаног система, креирана је резервна копија која је затим учитана у новоинсталирано НА окружење. Након учитавања резервне копије, све конфигурације (аутоматизације, сцене, интеграције, изглед картица, историја стања и др.) биле су доступне. Једино је било неопходно да се физички уређаји (паметне сијалице) поново упаре са системом. Ово потврђује да је могуће припремити „шаблон“ система који знатно поједностављује поставку за кориснике без техничког знања (нпр. истраживаче).

Тест исправности рада крајњих уређаја

Исправност рада паметних сијалица тестирана је у два корака:

- кроз НА корисничку спрегу, визуелно се проверава да ли измена стања (осветљеност, боја, температура) даје очекивани ефекат.
- коришћењем НА REST API и HTTP клијента (Postman). Спроведен је низ тестова над

својствима: осветљеност, температура, боја и комбинована промена више својстава одједном.

За свако својство је извршен пар HTTP захтева од стране Postman клијента ка REST серверу: упис нове вредности својстава; читање стања својстава. Додатно је вршено мерење укупног времена потребног да се ове операције изврше. У ту сврху су коришћени Postman алати: колекције, скрипте и окружење (енгл. collections, scripts, environment). Процедурa је поновљена 5 пута за свако својство.

Табела 1 показује резултате из којих се види да се својство осветљености мења очекивано (уз предвидљива ограничења), а уочени су тек спорадични случајеви кашњења REST одговора. Просечно измерено време одзива (упис + читање) било је 357,8 ms, што значи да је стварно време промене стања уређаја још краће (узети у обзир време које доприноси HTTP, као и да се у временски одзив рачуна и провера промене стања – други HTTP захтев). Резултат је значајно испод прихватљивог прага (~1s из поглавља 4.4) и не нарушава кориснички доживљај. Резултати су приказани за параметар јачине осветљености. На исти начин тестирана су и остала својства сијалица, са сличним резултатима, па се закључује да промена својстава паметних сијалица коришћењем НА окружења ради очекивано.

Табела 1. Резултати теста исправности рада крајњих уређаја за параметар осветљености

број теста	својство	жељена вредност	постављена вредност	дужина трајања теста, у ms	очекивано
1	осветљеност	1	1	348	да
2	осветљеност	255	255	350	да
3	осветљеност	300	255	364	да
4	осветљеност	0	null	373	да
5	осветљеност	100	null	није релевантно – тест неуспешан	не
6	осветљеност	100	100	354	да

Тест исправности рада паметне логике

Исправност рада паметне логике тестирана је подешавањем контролисаних сценарија у којима долази до активације аутоматизација од интереса и праћењем понашања система кроз НА алате: Преглед, Историју и Праћење. Преглед нуди приказ тренутног стања уређаја, Историја нуди приказ стања уређаја у прошлости а Праћење нуди детаљан приказ редоследа којим су се извршавале аутоматизације.

Аутоматизација буђења тестирана је скраћивањем трајања на 1 минут и постављањем броја корака на 30. Окидач је коригован како би се аутоматизација одмах извршила. Очекивано је да се на сваке 2 секунде (1мин / 30 корака) почевши од тренутка окидања аутоматизације, осветљеност повећава за по 3.3% (100% / 30 корака). Визуелни утисак, као и алати Преглед, Историја и Праћење су потврдили да се аутоматизација понаша очекивано.

Аутоматизација рада тестирана је креирањем посебног догађаја у Google календару (са кључном речи „work“ у наслову) и посматрањем реакције система. Догађај је креиран непосредно пре извршења теста, те се аутоматизација одмах извршава. Поново је визуелно и уз алате Преглед, Историја и Праћење потврђено да аутоматизација ради очекивано.

Аутоматизација припреме за сан тестирана је померањем времена окидача на термин близак тестном и смањењем размака између „пригушивања“ и гашења светла. Визуелно и уз алате Преглед, Историја и Праћење потврђено је да се параметри светла мењају онако како је дефинисано.

Закључак на основу извршених тестова

Тест робусности система је показао да је систем довољно стабилан да функционише током дужег временског периода. Тест преносивости и лакоће подешавања система је показао да систем решава проблеме компликоване поставке. Коришћење бежичних комуникационих протокола решава проблем промене конфигурације извора осветљења. Тест исправности рада крајњих уређаја је показао да систем решава проблем брзе и лаке промене својстава светлости. Тест аутоматизација доказује да је систем способан и за извршавање аутоматизованих радњи, те се тиме додатно олакшава истраживачима, који не морају мануелно манипулисати светлошћу. Избор извора осветљења је решио ману коришћења флуоресцентних уместо LED извора. Коришћене су најмодерније доступне технологије чиме се решава проблем коришћења застарелих технологија. На основу овога се може закључити да систем задовољава све задате критеријуме (поглавље 4.4) и решава све мане које су имали досадашњи системи (поглавље 1).

8. ЗАКЉУЧАК

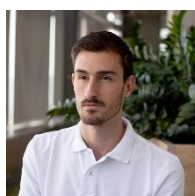
Циљ рада је дизајн и реализација IoT система за контролу осветљења у затвореном простору са намером да превазиђе ограничења светлосних система који се тренутно користе у научним истраживањима. Прегледом релевантне научне литературе потврђен је утицај светлости на продуктивност и здравље човека, као и недостаци до сада коришћених светлосних система. Као основа система је изабран софтвер паметне куће који је проширен имплементацијом аутоматизација. Систем је дизајниран, реализован и тестиран у складу са претходно дефинисаним критеријумима. Резултати тестирања показују да систем у потпуности испуњава постављене критеријуме и успешно отклања мане постојећих решења. Систем има и своја ограничења. Највеће ограничење је скалабилности система. У тренутном облику, систем је погодан за примену у мањим затвореним просторима и потребно га је скалирати како би био користан и у великим индустријским постројењима. Даљи рад може бити усмерен управо на решавање овог проблема.

9. ЛИТЕРАТУРА

- [1] Van Bommel, Ir WJM, Ir GJ Van Den Beld, and Ir MHF Van Ooyen. "Industrial lighting and productivity." Philips Lighting, The Netherlands 20 (2002): 8.

- [2] Juslén, Henri. "Lighting and productivity in the industrial working place." Proceedings of Fifteenth international symposium. 2006.
- [3] Juslen, Henri, Marius Wouters, and Ariadne Tenner. "The influence of controllable task-lighting on productivity: a field study in a factory." *Applied Ergonomics* 38.1 (2007): 39-44.
- [4] Juslén, Henri. "Influence of the colour temperature of the preferred lighting level in an industrial work area devoid of daylight." *Ingenieria Iluminatului* 8.18 (2006): 25-36.
- [5] Juslén, H. T., M. C. H. M. Wouters, and A. D. Tenner. "Lighting level and productivity: a field study in the electronics industry." *Ergonomics* 50.4 (2007): 615-624.
- [6] Juslén, Henri T., Jos Verbossen, and Marius CHM Wouters. "Appreciation of localised task lighting in shift work—a field study in the food industry." *International Journal of Industrial Ergonomics* 37.5 (2007): 433-443.
- [7] Juslén, H. T., and E. Kremer. "Localised lighting for efficient use of energy and better performance—Field Study in the factory." CIE midterm meeting and international lighting Congress, Leon 2005, Proceedings. 2005.
- [8] Kralikova, Ruzena, Miriama Piňosová, and Beata Hricová. "Lighting quality and its effects on productivity and human healths." *Int. J. Interdiscip. Theory Pract* 10 (2016): 8-12.
- [9] Davis, Lourdes K., et al. "Health effects of disrupted circadian rhythms by artificial light at night." *Policy Insights from the Behavioral and Brain Sciences* 10.2 (2023): 229-236.
- [10] Tähkämö, Leena, Timo Partonen, and Anu-Katriina Pesonen. "Systematic review of light exposure impact on human circadian rhythm." *Chronobiology international* 36.2 (2019): 151-170.

Кратка биографија:



Павле Вуковић рођен је у Зрењанину 2001. год. Мастер рад на Факултету техничких наука из области Електротехнике и рачунарства – Рачунарска техника и рачунарске комуникације - Софтвер за потрошачку електронику одбранио је 2025.год.

Контакт:

pavlevukovic68@gmail.com