

# Primena širinske pretrage i georeferenciranja za određivanje optimalne trase dalekovoda

## Application of Breadth-First Search and Georeferencing for Optimizing Overhead Line Route

Vladan Ristić<sup>\*\*</sup>, Darko Šošić<sup>\*\*</sup>, Dragana Ristić<sup>\*\*\*</sup>

\* Akcionarsko društvo „Elektromreža Srbije” Beograd, Kneza Miloša 11, 11000 Beograd

\*\* Elektrotehnički fakultet Univerziteta u Beogradu, Bulevar kralja Aleksandra 73, 11000 Beograd

\*\*\* Projektni biro i usluge „AL & SA” d.o.o. Pančevo, Miloša Trebinjca 78, 26000 Pančevo

**Rezime** - Tranzicija kroz koju energetski sektor trenutno prolazi podrazumeva izlazak iz pogona konvencionalnih generatorskih kapaciteta koji koriste fosilna goriva, kao i posledično okretanje prema obnovljivim izvorima energije i održivim principima proizvodnje. Ovo će neizbežno dovesti do potrebe za izgradnjom nove prenosne infrastrukture u cilju plasiranja energije koja je generisana u ovim kapacitetima ka ostatku sistema i ublažavanja potencijalnih problema u vezi sa preopterećenjem postojećih elemenata mreže. Kako bi se što preciznije ocenio uticaj novih projekata, poželjno je da se inženjerima na raspolaganju nalaze što bolje procene tehničkih parametara tih projekata, s tim što se ovo, za nove vodove, najvećim delom može prevesti u estimacije dužina trasa. To se, čak i u stručnim krugovima, uglavnom radi prema empirijskim metodama. Kako bi se to izbeglo, u ovom radu se predlaže inovativna tehnika za aproksimaciju dužine nadzemnih vodova, zasnovana na principu širinske pretrage i georeferenciranoj projekciji sistema koji će biti ojačan novim dalekovodom. Taj pristup dopušta, između ostalog, i uzimanje u obzir postojanja zona kroz koje trasa ne sme da prođe, poput gradskih sredina ili zaštićenih oblasti, i prelazak sa standardnog dvodimenzionalnog načina predstavljanja trase voda na mapi na trodimenzionalnu projekciju pomoću koje je moguće uvrstiti u razmatranje i razlike u nadmorskim visinama delova terena preko kojih dalekovod prelazi. Ovo bi, zajedno sa prilagodljivošću različitim mrežama i smanjivanjem rizika vezanog za nastanak grešaka usled loših procena parametara novih dalekovoda, moglo svrstati opisanu tehniku u red alata koji će u narednom periodu biti vrlo značajni za adekvatan razvoj prenosnih mreža.

**Ključne reči** - georeferenciranje, dalekovodi, najkraća trasa, planiranje razvoja sistema, širinska pretraga

**Abstract** - The transition through which the entirety of energy sector is passing at the moment causes the shift from the conventional generation capacities, based on fossil fuels, towards the renewable sources and sustainable energy production. This, in turn, can lead to the need for constructing the new transmission infrastructure, necessary for the evacuation of the produced energy and mitigation of the potential overloading of the existing elements. In order to evaluate the impact of the

proposed new projects, the engineers need to have the proper information regarding the technical characteristics of those projects, with this, for the power lines, meaning as accurate the estimation of the line length as possible. This estimation is rather difficult to perform even for the experts, with some of them frequently turning towards the empirical methods instead. To avoid that, this paper proposes a technique for approximation of the length of the line connecting the two specified nodes of the grid, founded on the breadth-first search principle and the georeferenced projection of the system. This allows the inclusion of the zones through which the route cannot pass, such as the cities or the protected habitats, and also provides opportunity to expand the common two-dimensional definition of line's length to the three-dimensional space, since the heights of the terrain sections can also be included. That, together with the ease of modifications for application on the various systems, could make this method a powerful tool for the system planning engineers, mitigating the risk of the potential errors that would be caused by the misestimations of the parameters of the new overhead lines.

**Index Terms** - Breadth-first search, Georeferencing, Overhead lines, System planning, Shortest route

### I UVOD

Kao što je već poznato i u stručnim, i u laičkim krugovima, u poslednjih desetak godina je došlo do značajnih promena u načinu doživljavanja koncepta rada elektroenergetskih sistema. U okviru promena, došlo je do okretanja od prethodno dominantnih elektrana na ugalj, proglašeni za jedne od glavnih izvora gasova izazivača efekta staklene bašte. Pri tome su, kao njihova zamena, predlagani izvori zasnovani na obnovljivim energentima, poput, na primer, vetroelektrana i solarnih elektrana. Ovakav zaokret bi mogao dovesti do posledica kao što su, primera radi, promene u smerovima tokova energije kroz elemente sistema, prebacivanje glavnih proizvodnih centara iz regija u kojima su locirani rudnici uglja u oblasti sa značajnim potencijalom za ekološki prihvatljivu proizvodnju energije i potrebe za hitnim razvojem infrastrukture za prenos energije u skladu sa novom konfiguracijom sistema i integracijom novopodignutih kapaciteta u njega. Naravno, razvoj infrastrukture mora, pored omogućavanja plasmana energije koja

je proizvedena u obnovljivim izvorima, obezbediti potrošačima pouzdano napajanje električnom energijom, shodno potrebama i odgovarajućim standardima koji pokrivaju ovu problematiku.

Iako je ovaj zadatak već i sam po sebi jako izazovan, situacija se dodatno komplikuje ako se u obzir uzmu i praktična ograničenja sa kojima se suočavaju inženjeri zaduženi za planiranje razvoja sistema, posebno ukoliko se razmatraju projekti koji obuhvataju izgradnju novih dalekovoda. Konkretno, empirijski je pokazano da je jedan od koraka na koje se potroši najveći deo vremena pri realizaciji takvih projekata definisanje trase tih vodova i, shodno tome, pribavljanje potrebnih dozvola i uslova. Na ova odlaganja, na primer, mogu uticati teškoće vezane za zabrinutost stanovnika u oblastima kroz koje bi trasa trebalo da prođe. Ta zabrinutost je, u najvećem broju slučajeva, vezana za potencijalni uticaj voda na zdravlje [1,2]. Uz to, problem mogu predstavljati i efekti koje bi nova elektroenergetska infrastruktura mogla da ima na određene ekološke indikatore, kao što je biodiverzitet, što postaje posebno značajno u slučajevima u kojima bi predviđena trasa dalekovoda trebalo da prođe kroz neke od zaštićenih prirodnih oblasti [3-5]. Kao ilustrativni primer takvih problema se može navesti slučaj iz Niša [6], gde su, iz protesta protiv podizanja novog dalekovoda, građani naselja Brzi Brod zatrpavali rupe kopane za postavljanje temelja stubova. Time je realizacija ovog projekta jako usporena, a rok njegove realizacije pomeren za više meseci. Iz tog primera se jasno može videti kompleksnost problema koje planeri razvoja sistema moraju rešavati kako bi se funkcionalnost istog održala.

Uz to, operatori sistema često raspolazu ograničenim budžetom, zbog čega se od predloženih projekata moraju odrediti oni koji se smatraju prioritetnim, dok se preostali projekti, ako budžet kojim se barata nije dovoljan, odlažu ili se od njih potpuno odustaje. Ta problematika će u narednim godinama biti posebno izražena zato što su cene materijala potrebnih za realizaciju novih projekata od proleća 2022. godine zabeležile značajan porast. Kao što se može zaključiti, ovo je direktno uvezano sa ratom u Ukrajini i uticajem istog na prilike u ekonomiji i oblasti prekograničnog transporta. Za bolje pojašnjenje efekata koje ovaj sukob ima na pokazatelje od interesa za projekte operatera sistema, može iskoristiti primer naveden u [7], gde je istaknuto da je cena čelične armature samo u martu 2022. godine skočila za čak 30% u odnosu na februar te godine. Kada se uvaži i to da je čelik potreban za gotovo svaki od projekata izgradnje novih dalekovoda, gde se koristi i za stubove, i za mehaničko ojačavanje provodnika, postaje jasno u kojoj meri ovakvo stanje može da utiče na cene ovakvih projekata. Ovakav zaključak predstavlja dodatni argument u korist prethodno iznete tvrdnje prema kojoj će operatori sistema morati da redukuju broj projekata koje mogu u potpunosti završiti u narednom periodu.

Kako bi se, kao što je već pojašnjeno, definisali prioritetni među svim predloženim projektima, operatori sistema moraju smišljati različite načine na koje će vršiti ocenjivanje projekata. Ti načini, poznatiji kao metodologije za prioritizaciju, mogu da se vide i u desetogodišnjim planovima razvoja različitih sistema, gde bi se primer mogao naći u Planu razvoja prenosnog sistema Republike Srbije za period od 2021. do 2030. godine [8]. Po metodologiji iz ovog dokumenta, moraju se posmatrati kako sredstva koja treba uložiti u realizaciju svakog projekta, tako i poboljšanja prilika u sistemu do kojih bi svaki od projekata mogao da dovede. Jasno je da je za ovu procenu, na osnovu koje se određuje i to koji će od

projekata biti uvršteni u trogodišnji Plan investicija u prenosni sistem, neophodno raspolagati ulaznim informacijama što bolje kvaliteta kako bi se povećala pouzdanost sprovedenog postupka.

Kvalitet ovih ulaznih podataka, sa druge strane, direktno zavisi i od pretpostavki koje je potrebno načiniti pre prioritizacije, poput, primera radi, procena dužina novih dalekovoda. Ovaj parametar utiče kako na estimaciju potrebnih ulaganja u projekat (pošto se cena ovakvih projekata tipično izračunava tako što se procenjena dužina množi odgovarajućom jediničnom cenom, te je, po pitanju potrebnih ulaganja, bolje da trasa voda bude što kraća), tako i na fazu procene uticaja projekta na situaciju u sistemu (zato što se, kao i ulaganja, i tehnički podaci o vodu obično određuju tako što se procenjena dužina istog pomnoži jediničnim parametrima). Pored toga što je takvu procenu teško napraviti samo upotrebom geografske mape, dodatnu dimenziju ovom problemu daje i to što postoje oblasti preko kojih novi vodovi ne bi smeli da pređu, kao što su urbana područja i nacionalni parkovi, na primer. Sada bi se moglo postaviti pitanje na koji je način moguće u obzir uzeti sve potrebne aspekte uz zadržavanje odgovarajućeg stepena tačnosti i efikasnosti predloženih procedura. Rešenja za ovo su predlagana u nemalom broju radova [9-12], gde je svaki od tih radova makar u izvesnoj meri dodavao neko poboljšanje u uobičajeno usvajane metode za mapiranje reljefa terena i određivanje dužine najkraće trase dalekovoda kojim bi se povezala neka dva čvora u sistemu. Na primer, rad [9] predlaže i do detalja analizira opciju primene LIDAR (eng. *Light Detection and Ranging*) tehnologije kako bi se, pre samog početka definisanja trase dalekovoda, raspolagalo što boljim informacijama vezanim za stanje terena u regionima u kojima bi ta trasa trebalo da se nalazi. Kroz ovakva ispitivanja, u radu se došlo do zaključka da bi preciznost koju bi korišćenje te tehnike moglo da donese dovela do uštede u projektima u okviru kojih će se graditi novi dalekovodi. Ušteda bi, zavisno od slučaja do slučaja, mogla da dostigne čak i 10% inicijalno procenjenog iznosa ulaganja u razmatrani projekat. Ako se uzme u obzir da se vrednosti investicija u projekte novih dalekovoda na kojima rade operatori prenosnih sistema leže u granicama od nekoliko stotina hiljada evra do nekoliko desetina miliona evra (posebno ukoliko se posmatraju 400 kV koridori dugački po više od 100 km), jasno je da bi ušteda od 10% te vrednosti mogla u velikoj meri pomoći operatoru oslobađanjem prostora u raspoloživom budžetu. Na taj način bi se sredstva koja bi inače bila rezervisana za postavljanje novog dalekovoda mogla da budu preusmerena u neke od ostalih projekata, čime bi se ubrzala i realizacija tih projekata, a situacija u sistemu relaksirala. Naravno, dodatno se mora naglasiti da bi to bila ušteda koja bi se ostvarila samo na jednom projektu. Ako bi se ta ušteda sada pomnožila brojem projekata podizanja vodova na kojima operatori sistema često i simultano rade, postalo bi još jasnije koliko bi preciznije određivanje trase novog dalekovoda moglo unaprediti pouzdanost procesa planiranja razvoja sistema. Na primer, prema [8], operator prenosnog sistema Srbije planira da u narednom periodu izgradi čak četiri 400 kV koridora koji će prelaziti preko teritorije Srbije. Svaki od ovih koridora (Panonski koridor, Transbalkanski koridor, Severni koridor i Centralno-balkanski koridor) obuhvata izgradnju 400 kV dalekovoda čija će se dužina kretati u granicama od oko 80 km do više od 300 km. Takođe, potrebno je istaći da procenjena ulaganja u ove koridore iznose nekoliko stotina miliona evra, kao i da se, uz njih, planira i izgradnja velikog broja internih dalekovoda 110 kV naponskog

nivoa. Ako bi se razmatranje sada vratilo na to da bi, korišćenjem tehnike predložene u [9], uštede mogle iznositi i do 10% ulaganja u ove projekte, postalo bi još jasnije u kojoj bi meri takve tehnike ubuduće mogle uticati na raspodelu budžeta operatora sistema.

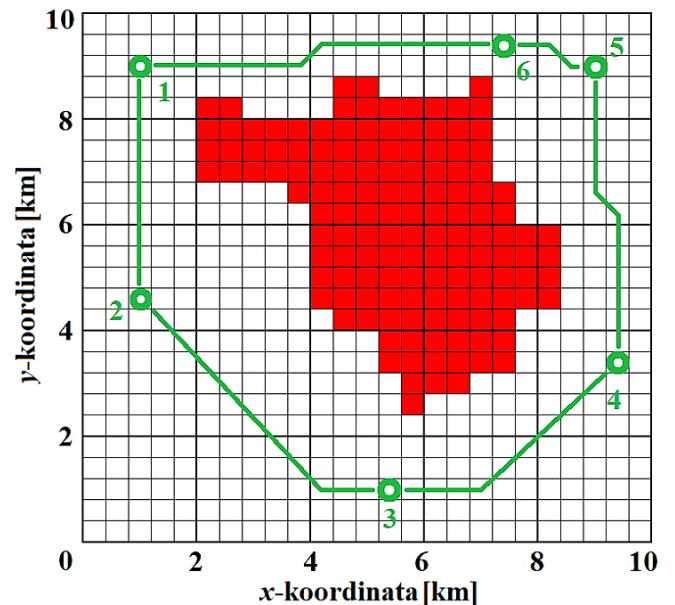
Nažalost, nijedna od metoda iz navedenih radova nije, bez obzira na potencijalne pozitivne posledice koje bi se mogle očekivati od njihovog korišćenja, naišla na adekvatan odziv među inženjerima zaduženim za planiranje razvoja mreže. Ako bi se ovde postavilo pitanje uzroka usled koga je došlo do manjka interesovanja za te tehnike, moglo bi se doći do dva osnovna razloga iz kojih, prema mišljenju autora ovog rada, nije zabeležena njihova šira primena. Prvi je opštepoznata činjenica po kojoj se predlaganje ma kakvih inovativnih tehnologija vrlo često susreće sa skepticizmom među zaposlenima na čije bi aktivnosti ta inovacija uticala. Drugi uzrok bi bila činjenica da se, ukoliko se tehnika predstavi kao napredna i apstraktna, smanjuje stepen voljnosti zaposlenih da je isprobaju, na šta bi se, za razliku od prvog navedenog razloga, moglo uticati tako što bi se tehnika približila zaposlenima i predstavila striktno kao nadogradnja empirijskih metodologija koje oni svakodnevno koriste. Uz uzimanje i ove problematike u obzir, u ovom radu se predlaže metoda za nalaženje optimalne trase novih dalekovoda, zasnovana na širinskoj pretrazi - jednostavnoj, intuitivnoj i efikasnoj tehnici namenjenoj pretrazi grafova u svrhe nalaženja najkraćeg puta kojim bi se povezala dva predefinisana čvora uz uvažavanje postavljenih pravila i ograničenja [13]. Pored toga što se primenom ove tehnike unapređuje proces nalaženja optimalne trase novog voda, upotreba georeferencirane projekcije sistema je dozvolila da se u razvijenu metodu uključe kako tehničke odlike tog sistema, tako i karakteristike terena na kome se sistem nalazi. Ovo je, opet, dopustilo da se iz standardnog dvodimenzionalnog predstavljanja sistema u ravni, po logici geografske mape, pređe u prikazivanje mreže u trodimenzionalnom prostoru. Ova odluka je dovela do toga da je bilo moguće da se, prilikom izračunavanja dužine trase voda, u obzir uzmu i razlike u nadmorskim visinama delova terena preko kojih bi ta trasa prelazila. Iako bi se, na prvi pogled, moglo učiniti da te razlike nemaju veliki uticaj na dužinu trase, u praksi bi se mogao naći veoma veliki broj primera kojima bi se dokazalo suprotno, posebno u planinskim predelima gde bi trasa morala da prelazi provalije i litice čiju bi gotovo vertikalnu prirodu bilo poželjno uzeti u razmatranje pri proceni dužine iste.

Što se organizacije rada tiče, on će, pored uvodnog segmenta, biti podeljen u još četiri poglavlja. Drugo poglavlje rada će se, u cilju što boljeg pojašnjavanja uvodnih pretpostavki koje su korišćene za potrebe sprovedenih analiza, zasnivati na detaljnom opisivanju kreiranog test-sistema i reljefa terena na kome usvojeno da se taj sistem nalazi. Treće poglavlje će se baviti samom metodologijom za određivanje dužina trasa novih dalekovoda. Pritom će se početi od opšte definicije širinske pretrage koja se koristi za grafove, da bi se potom pojasnila svaka od modifikacija koje je bilo potrebno implementirati u ovu tehniku kako bi se omogućila primena iste u svrhe navedene u ovom radu. Nakon toga će četvrto poglavlje biti fokusirano na prikaz rezultata dobijenih u okviru sprovedenih analiza, pri čemu će posebna pažnja biti obraćena na poboljšanja koja je korišćenje razvijene metodologije donela u poređenju sa standardnim tehnikama koje se koriste za procenu dužina vodova u operatorima sistema. Stoga će se u ovom poglavlju pružiti uvid u urađenu uporednu analizu rezultata dobijenih za slučaj u kome je korišćena standardna empirijska metoda i za slučaj u kome je u

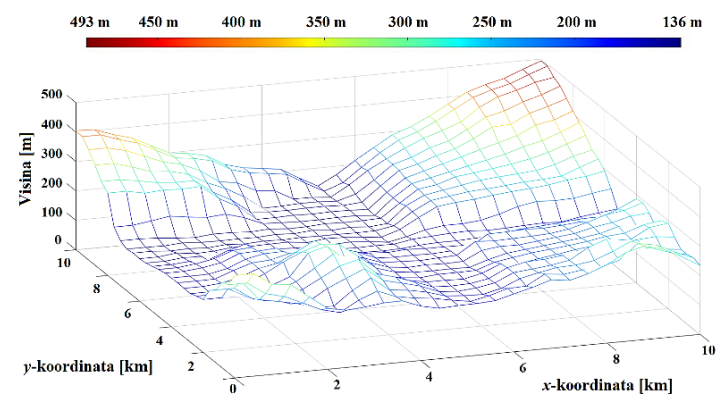
te svrhe primenjena ovde razvijena tehnika, bazirana na širinskoj pretrazi grafova. Na samom kraju rada će se nalaziti zaključak u kome će se rezimirati ishodi aktivnosti urađenih za potrebe rada i napomenuti potencijal koji ova tehnika nudi za dalja istraživanja.

## II OPIS TEST-SISTEMA I RELJEFA TERENA

Kako bi se primena razvijene metode ilustrovala na odgovarajući način, kreiran je test-sistem, sačinjen od šest čvorova. Iako ovde nije bilo presudno kog su naponskog nivoa ti čvorovi, u praksi se može dogoditi da naponski nivo predstavlja ograničavajući faktor i trebalo bi ga, stoga, uzeti u obzir ako bi se ova tehnika koristila za proračune koji bi prethodili nekom od stvarnih projekata. Pri formiranju test-sistema, pretpostavljeno je da je svaki od čvorova u njemu povezan samo sa dva susedna čvora, te da je test-sistem koncipiran prstenasto.



Slika 1. Georeferencirana mapa terena i test-sistema



Slika 2. Nadmorske visine terena u izabranoj oblasti

Za potrebe analiza obavljenih u ovom radu je smatrano da se ovaj test-sistem nalazi na delu terena čiji reljef potpuno odgovara reljefu oblasti oko grada Kruševca, locirane u Centralnoj Srbiji. Ova oblast je izabrana pošto raspolaže obema karakteristikama bitnim sa aspekta razvijene metode - urbanom sredinom preko koje trasa voda ne bi mogla preći i varijacijama u nadmorskoj

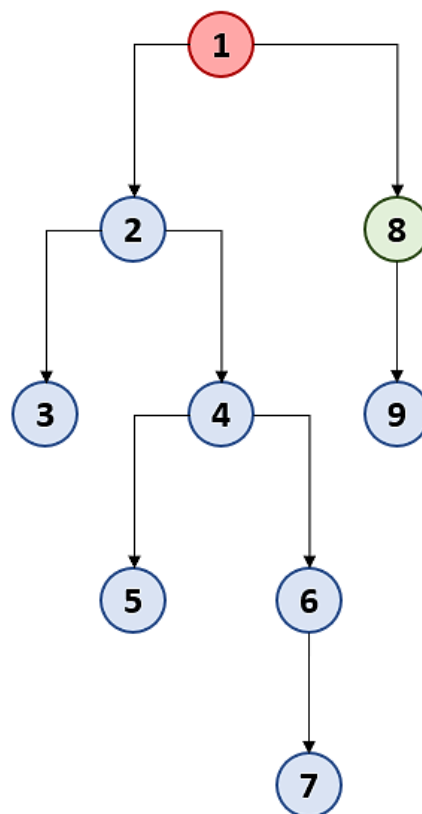
visini koje su dovoljno izražene da bi mogle uticati na procenu dužine novog dalekovoda. Izabrana oblast se proteže po 10 km u pravcima od istoka ka zapadu i od severa ka jugu, te je njena ukupna površina jednaka 100 km<sup>2</sup>. Mapa na kojoj je data ova oblast sa ucrtanim test-sistemom (označeno zelenom bojom) i sa naznačenom gradskom sredinom (označeno crvenom bojom) se može videti na Sl. 1. Nadmorske visine delova terena u oblasti izabranog za ove analize, preuzete iz [14], prikazane su na Sl. 2.

### III OPIS KORIŠĆENE METODOLOGIJE

Kao što je i naznačeno u uvodnom poglavlju ovog rada, njegovo treće poglavlje je posvećeno opisivanju kreirane metodologije za procenjivanje dužina trasa novih dalekovoda. Ovde je, pre svega, potrebno objasniti šta je širinska pretraga grafova i zbog čega je baš ona odabrana kao baza na kojoj je zasnovana tehnika koja je predstavljena u ovom radu. Kako bi se to uradilo, potrebno je, na samom početku, malo izmeniti način na koji se sistem posmatra. Naime, za primenu ove metode je neophodno sagledavati sistem i teren na kome se on nalazi ne kao skup postrojenja i vodova, već kao graf sačinjen od čvorova i grana između njih. Ako bi se čitav region na kome se nalazi posmatrani sistem podelio na definisan broj delova terena, tada bi svaki od tih delova terena predstavljao po jedan čvor grafa. Postrojenja ovog sistema bi, u ovom slučaju, bila pripisana čvorovima grafa koji odgovaraju delovima terena na kojima se ta postrojenja u praksi nalaze. Grane grafa bi, prema tome, postojale između čvorova koji odgovaraju delovima terena koji se fizički graniče. U takvoj predstavi sistema bi najkraći put od jednog do drugog čvora grafa zapravo bio jednake dužine kao i optimalna trasa novog voda između postrojenja koja su locirana na delovima terena koji odgovaraju povezanim čvorovima. Zbog toga su, prilikom odabira metode za pronalaženje optimalne trase novog dalekovoda, razmatrane samo dve tehnike koje se najčešće biraju za pretraživanje grafova i nalaženje najkraćeg puta između dva čvora u njima - dubinska pretraga i širinska pretraga. Kako bi se objasnilo i zbog čega je širinska pretraga dobila prednost u odnosu na dubinsku pretragu, biće detaljno razmotrena primena i jedne, i druge metode na primer fiktivnog grafa u kome bi trebalo naći najkraći put između dva čvora. Ilustracija primene dubinske pretrage za pronalaženje željenog puta se može videti na Sl. 3.

Ovaj primer podrazumeva slučaj u kome se traži najkraći put od čvora označenog crvenom bojom (čvor broj 1 na Sl. 3) do čvora označenog zelenom bojom (čvor broj 8 na istoj slici). Brojevi koji su upisani u svaki od čvorova predstavljaju redosled kojim bi ovi čvorovi bili testirani ukoliko bi se koristila dubinska pretraga. Tu bi algoritam krenuo od početnog čvora, a potom bi pronašao prvu granu koja vodi od tog čvora. Put trasiran tom prvom granom bi bio ispraćen sve do prvog sledećeg račvanja, gde bi algoritam još jedanput izabrao prvu moguću granu i nastavio da je prati. Kada stigne do kraja puta definisanog granama biranim na ovaj način, algoritam se, ukoliko na tom putu nije pronašao ciljani čvor, vraća do poslednjeg račvanja koje je prešao i nastavlja da prati sledeću granu koja vodi od tog račvanja. Taj postupak se ponavlja dok se ne pronađe ciljani čvor. Međutim, ovakav pristup ima i nekoliko nedostataka. Prvo, ako dužina puteva nije ograničena, može doći do situacije u kojoj bi algoritam završio u beskonačnoj petlji koja bi morala da se zaustavi manuelno. Drugo, ako bi postojalo više od jednog puta od početnog do ciljnog čvora, algoritam bi, nakon završetka postupka, predložio taj na koji je prvo naišao, što ne bi nužno značilo da neki od ostalih puteva nije bio kraći od njega. U

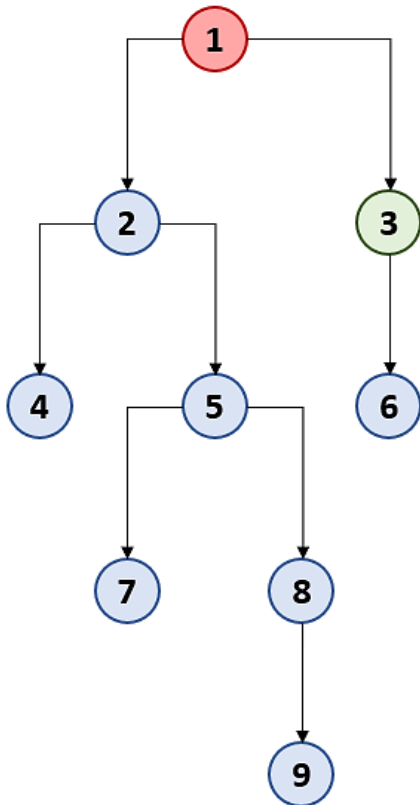
cilju izbegavanja takvih problema, odlučeno je da se predložena metoda ipak bazira na širinskoj pretrazi, predstavljenoj na Sl. 4. I u ovom primeru je bilo potrebno naći put od crvenog do zelenog čvora, s tim što je, kao što se može zaključiti na osnovu upisanih brojeva, ova metoda to uradila daleko efikasnije. Ovakva tehnika pretrage polazi od početnog čvora, a zatim proverava da li je neki od čvorova direktno povezanih sa njim ciljni. Ako nije, algoritam testira čvorove direktno povezane sa čvorovima koji su povezani sa početnim i tako sve dok ne pronađe ciljani čvor. Kada se željeni čvor nađe, korisniku se predlaže optimalni put između čvorova.



Slika 3. Primer dubinske pretrage grafa

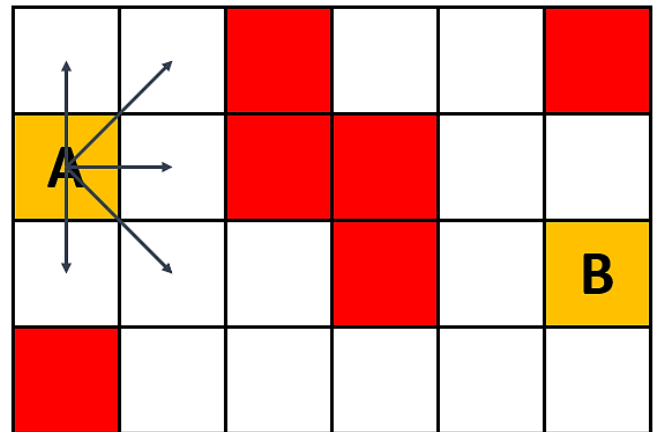
Nakon što je objašnjeno zbog čega je odabrana širinska pretraga, može se preći i na pojašnjenje toga na koji bi način ona mogla da pomogne prilikom traženja optimalne trase novog dalekovoda. U te svrhe, formirana je posebna mreža od 24 kvadratna polja, gde je dužina stranice svakog od ovih kvadrata smatrana jediničnom. Zadatak je bio pronaći optimalni put od polja označenog slovom A do polja označenog slovom B, pri čemu taj put nije smeo preći preko polja obojenih crvenom bojom. Ukoliko bi se primenio već pojašnjeni princip prema kome bi svako polje odgovaralo jednom čvoru grafa, postalo bi jasno da bi prikazani zadatak bilo moguće svesti na problem sa prethodne dve slike, gde bi polje obeleženo slovom A bilo polazni, a polje obeleženo slovom B ciljani čvor. U slučaju primene standardne metode širinske pretrage, prvi korak bi, shodno opisu, predstavljala provera da li je neki od čvorova sa kojima je polazni čvor direktno povezan ciljani čvor. Ako bi se tu smatralo (u skladu sa uobičajenim načinom primene ove tehnike za pretragu prostora) da je polje direktno povezano samo sa onim poljima sa kojima deli stranicu, tada bi se u prvom koraku obavio test polja iznad, ispod i desno od početnog polja. To je prikazano

na Sl. 5. Unapređena verzija ovog algoritma, predložena u ovom radu, uvažava pretpostavku po kojoj se polje graniči sa nekim od drugih polja i u slučaju u kome dele samo teme. Ovime se metodi pretrage dozvoljava da već u prvom koraku testira ne tri, već pet polja, kao što se može videti na Sl. 6. U opštem slučaju bi se broj mogućih smerova kretanja povećao sa šest na osam, ali je to ovde bilo nemoguće zato što bi kretanje nalevo narušilo granice mreže.

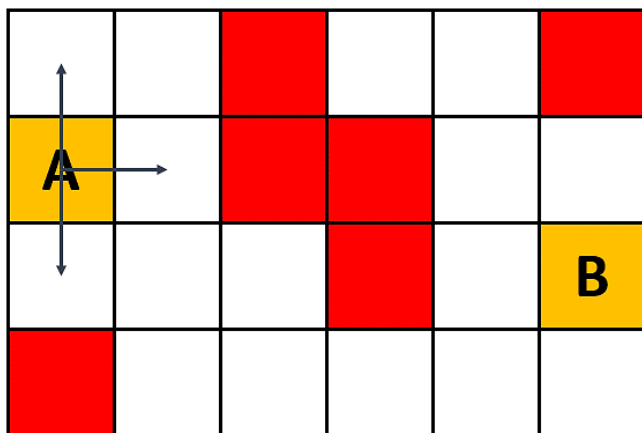


Slika 4. Primer širinske pretrage grafa

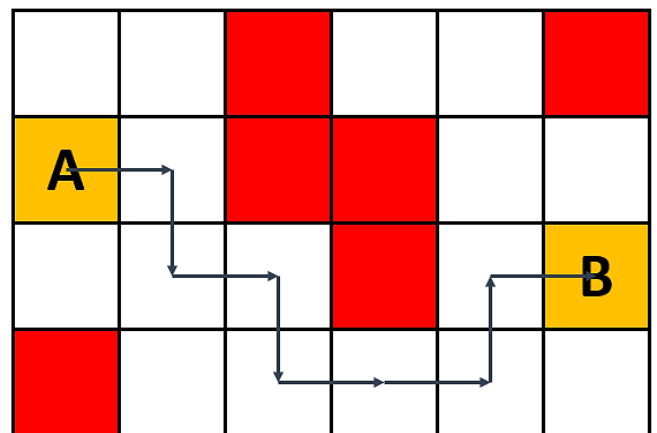
kvadratnog polja. Ako bi se koristila opisana unapređena tehnika, dužina svakog koraka načinjenog preko temena kvadratnog polja bi morala biti određena kao dužina stranice tog polja pomnožena kvadratnim korenom iz dva. Kako bi se to moglo uzeti u obzir pri izračunavanju dužine odabranog puta, potrebno je upamtiti i broj dijagonalnih koraka načinjenih na tom putu. Takođe, u slučaju da se do ciljnog čvora može stići na više od jednog načina, a u istom broju koraka, kao optimalni put se, zbog manje apsolutne dužine, korisniku nudi onaj koji uključuje manje dijagonalnih koraka, te je predlog koji korisnik vidi onaj koji je, za taj slučaj, optimalan. Da bi se prikazali efekti korišćenja unapređene metode, Sl. 7 i Sl. 8 prikazuju trase optimalnih puteva od polja A do polja B sudeći po standardnom i po unapređenom algoritmu. Optimalni put je, u slučaju u kome je korišćena standardna metoda, pronađen u osam koraka, te je njegova dužina jednaka osmostrukoj dužini stranice kvadratnog polja, što je, za ovde iznete pretpostavke, jednako 8. Što se tiče slučaja u kome je korišćena unapređena metoda, tu je optimalni put nađen u pet koraka, od kojih su tri bila dijagonalna. Shodno tome, dobijena je dužina trase jednaka 5,63. To znači da je dužina trase predložene od strane standardne metode za 28,4% veća od dužine trase dobijene pomoću unapređene tehnike.



Slika 6. Prvi korak prema unapređenoj pretrazi prostora



Slika 5. Prvi korak prema standardnoj pretrazi prostora



Slika 7. Optimalna trasa prema standardnoj pretrazi prostora

Naravno, ovo se moralo odraziti na način na koji se, nakon što se optimalna trasa pronađe, izračunava njena dužina. Ukoliko bi se koristila tipična metoda pretrage prostora zasnovana na širinskoj pretrazi, dužina trase bi bila jednaka proizvodu broja koraka koje je bilo potrebno napraviti da bi se došlo do cilja i dužine stranice

Iako je evidentno da je i samo uključivanje dijagonalnog kretanja kroz mrežu doprinelo povećanoj tačnosti dobijenih rezultata, ovo nije jedino poboljšanje koje je načinjeno u predloženoj tehnici za procenu dužine trasa novih dalekovoda. Naime, sva ovde izneta razmatranja su se odnosila isključivo na slučaj pri kome je sistem

predstavljen u dvodimenzionalnoj ravni. Ipak, u stvarnom životu, situacija može biti drugačija, pa može postojati značajna razlika između visina različitih delova terena preko kojih trasa treba da pređe. Ovo može uticati na dužinu te trase, ali ne može biti uzeto u razmatranje sve dok se oblast u kojoj se taj sistem nalazi gleda samo kao ravan. Kako bi uticaj razlika nadmorskih visina mogao biti uvažen u razvijenoj metodologiji, bilo je neophodno preći iz dvodimenzionalne ravni u trodimenzionalni prostor, pri čemu je i svakom od kvadratnih polja na koje je podeljena obrađena oblast bilo potrebno pripisati odgovarajuću nadmorsku visinu. Postupak nakon toga bi se najbolje mogao opisati na sledećem test-primeru u kome bi bilo potrebno naći udaljenost između kvadratnih polja 1 i 2, pri čemu bi se ova polja graničila preko jedne stranice. Prvi korak bi ovde bio usvajanje pretpostavke po kojoj bi ova distanca mogla biti izjednačena sa udaljenošću između centara ovih polja. Udaljenost između centara bi tada mogla biti određena prema:

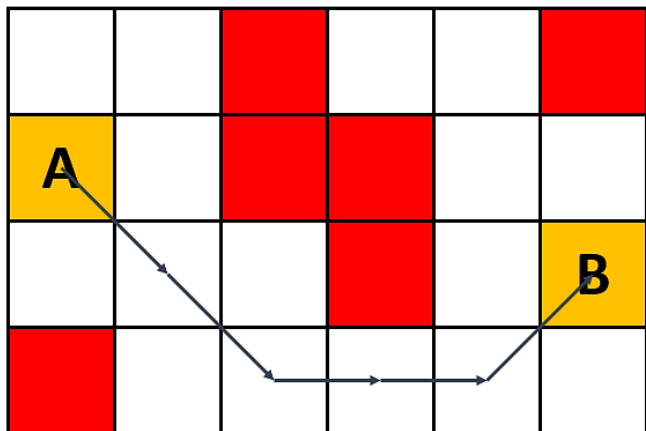
$$D_{1-2} = \sqrt{D_{hor1-2}^2 + (H_2 - H_1)^2} \quad (1)$$

gde su:

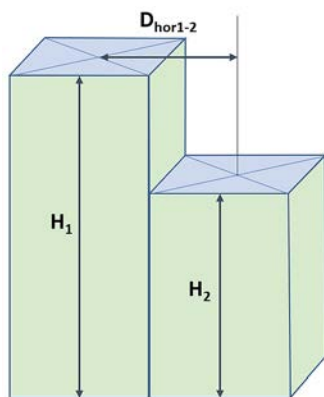
$D_{1-2}$  - udaljenost između centara polja,

$D_{hor1-2}$  - horizontalna udaljenost između centara projekcija polja u ravni,

$H_1$  i  $H_2$  - nadmorske visine polja. Oznake su date i na Sl. 9.



Slika 8. Optimalna trasa prema unapređenoj pretrazi prostora.



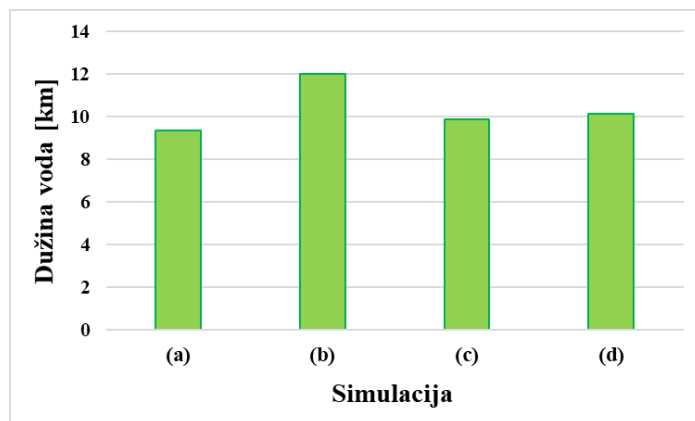
Slika 9. Uključivanje nadmorskih visina u proceduru

Ako bi sada bilo potrebno odrediti optimalnu trasu puta između

unapred definisanog početnog i ciljnog kvadratnog polja, slično primeru sa prethodne stranice, krenulo bi se od toga da se pronađe ne samo najkraći put između njih u dvodimenzionalnoj ravni, već bi se pronašlo (pod uslovom da ih toliko postoji) deset nezavisnih najkraćih puteva između ovih polja. Ako ovih puteva ne bi postojalo toliko, uzelo bi se onoliko nezavisnih trasa koliko ih postoji. Broj od deset nezavisnih puteva u dvodimenzionalnoj ravni, određenih u skladu sa metodologijom ilustrovanom na Sl. 8, odabran je empirijski, kroz veliki broj testiranja razvijene tehnike na različitim primerima. Potom bi svaki od tih deset puteva bilo potrebno prebaciti u trodimenzionalni prostor, primenom obrasca (1) onoliko puta koliko je iteracija odrađeno kako bi se formirala razmatrana trasa. Kada bi se to izvršilo, ona trasa koja bi u ovom prostoru imala najmanju dužinu bila bi proglašena optimalnom, a njena dužina bi potom bila prikazana kao dužina najkraćeg puta. Ovime bi se procedura opisana u ovom radu i zvanično završila.

#### IV PRIKAZ DOBIJENIH REZULTATA

Kako bi se sprovelo testiranje razvijenoj algoritma, uzet je primer prikazan na Sl. 1, pri čemu je usvojeno da je novim dalekovodom potrebno povezati čvor 2 (na levoj strani mape) sa čvorom 4 (na desnoj strani mape). Ti čvorovi su prevashodno izabrani zato što se između njih nalazi gradska sredina, označena crvenom bojom, pa je algoritam imao prilike da demonstrira ugrađenu sposobnost zaobilaznja zona preko kojih u realnosti ne bi bilo moguće proći novim nadzemnim vodom. Prema koordinatnom sistemu koji je označen na odgovarajućoj mapi mreže, kvadratnom polju na kom se nalazi čvor 2 bi odgovarale koordinate (1, 4,6), dok bi polju na kome je lociran čvor 4 bio pripisan par koordinata (9,4, 3,4). Kao što se može videti, dužina stranice jednog kvadratnog polja je, za ovaj slučaj, iznosila 400 m.



Slika 10. Uporedni prikaz dobijenih rezultata.

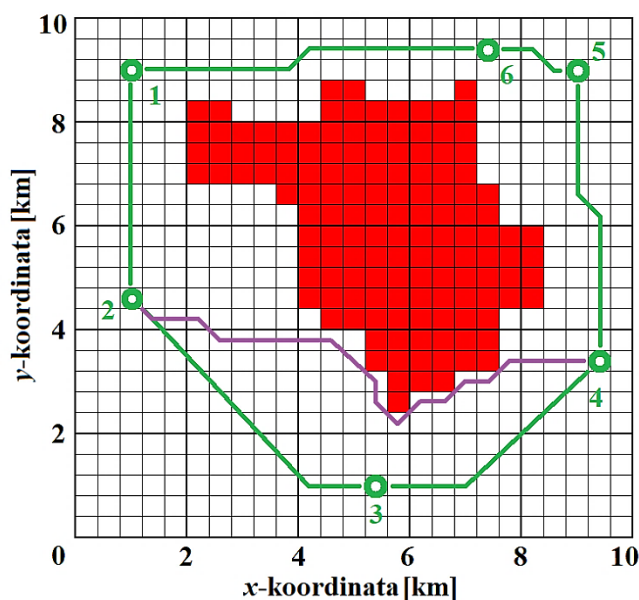
Sprovedene su četiri simulacije:

- Simulacija (a): dužina novog dalekovoda je računata po empirijskoj formuli, tako što je dužina duži povučene od jednog do drugog čvora na mapi uvećana za 10%. Po toj metodi, dobijeno je da je dužina voda jednaka 9,34 km.
- Simulacija (b): dužina novog dalekovoda je računata po sistemu klasične širinske pretrage u dvodimenzionalnoj ravni, slično onome što je prikazano na Sl. 7. Prema toj metodi, dobijeno je da je dužina voda jednaka 12 km.
- Simulacija (c): dužina novog dalekovoda je računata po

principima unapređene širinske pretrage u ravni, slično onome što je prikazano na Sl. 8, na prethodnoj stranici. Na ovaj način je dobijeno da je dužina voda 9,88 km.

- Simulacija (d): dužina novog dalekovoda je računata po pravilima algoritma za pretragu prostora u tri dimenzije, kao što je opisano pred kraj prethodnog poglavlja. Po taj metodi, dobijeno je da je dužina voda jednaka 10,13 km.

Da bi se olakšala uporedna analiza dobijenih rezultata, kreiran je dijagram na Sl. 10, na kome se mogu videti sve četiri rezultata iz gornje liste. Na kraju je, za simulaciju (d), to jest, slučaj u kome je korišćen razvijeni inovativni algoritam, formirana i mapa koja je data na Sl. 11. Ova mapa predstavlja nadogradnju mape sa Sl. 1, pri čemu se na njoj, osim svega datog na osnovnoj mapi, može videti i preporučena trasa novog dalekovoda između čvorova 2 i 4, memorisana u toku vršenja iteracija obuhvaćenih algoritmom i naznačena ljubičastom bojom na ovoj mapi u svrhe vidljivosti.



Slika 11. Preporučena trasa novog dalekovoda.

#### V ZAKLJUČAK

Kao što se može zaključiti sa dijagrama datog na Sl. 10, rezultati dobijeni različitim metodama ukazuju na to da su u simulacijama (a) i (c) izračunate dužine koje su manje od dužine koja odgovara simulaciji (d). Sa druge strane, krajnji rezultat simulacije (b) bila je dužina koja je veća od one dobijene simulacijom (d). Mada se, na prvi pogled, može činiti da su apsolutne razlike u rezultatima ovde prilično male, to se može i mora pripisati tome što je dužina voda koji se posmatra svega oko 10 km, a da je cela obuhvaćena oblast površine jednake 100 km<sup>2</sup>. Ukoliko bi se identične metode primenile na slučajeve iz inženjerske prakse u kojima je potrebno povezati postrojenja udaljena po nekoliko desetina, pa i nekoliko stotina kilometara, postalo bi jasno u kojoj bi meri iste relativne razlike uticale na raspodelu raspoloživog budžeta operatora. Iako je i iz prikazanog test-primera relativno evidentno u kojoj bi meri inovativna tehnika predložena u radu mogla pomoći u planerskim aktivnostima, to bi postalo još očiglednije ako bi se uzelo u obzir i to da tipična cena 110 kV dalekovoda iznosi oko 175000 €/km [15]. Pored toga što se korišćenjem novog algoritma inženjerima omogućava dodatni stepen pouzdanosti pri raspodeli finansijskih

sredstava, ugrađena funkcionalnost ove tehnike pomoću koje se, pored dužine novog voda, korisnicima daje uvid u trasu kojom bi taj vod trebalo da se kreće dozvoljava blagovremeno otpočinjanje procedura pribavljanja neophodne dokumentacije, čime se mogu značajno ublažiti kašnjenja u gradnji projekata usled nedostataka potrebnih dozvola i birokratskih petlji koje bi se time pokrenule.

Sve ovo se može uzeti kao potvrda ne samo toga da bi razvijena metoda mogla biti od koristi velikom broju stručnjaka zaduženih za planiranje novih projekata u sistemima, već i toga da se u ovoj oblasti može naći značajan prostor za unapređivanje, pri čemu se gotovo svaki aspekt planerskih procesa može bar u izvesnoj meri učiniti preciznijim ili efikasnijim. U skladu sa time, i autori ovog rada će svoja dalja istraživanja usmeriti ka automatizaciji ostalih koraka u realizaciji projekata, posebno onih koji podrazumevaju izgradnju infrastrukturnih objekata od značaja kako za operatora sistema, tako i za korisnike koji se preko tog sistema snabdevaju.

#### LITERATURA/REFERENCES

- [1] Dib, D., Mordjaoui, M. Study of the Influence High-voltage Power Lines on Environment and Human Health (Case Study: The Electromagnetic Pollution in Tebessa City, Algeria), *Journal of Electrical and Electronic Engineering*, Vol. 2, No. 1, pp. 1-8, 2014. <https://doi.org/10.11648/j.jee.20140201.11>
- [2] Carles, C., Esquirol, Y., Turuban, M., Piel, C., Migault, L., Pouchieu, C., Bouvier, G., Fabbro-Peray, P., Lebailly, P., Baldi, I. Residential proximity to power lines and risk of brain tumor in the general population, *Environmental Research*, Vol. 185, pp. 109473, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.109473>
- [3] Biasotto, L.D., Kindel, A. Power lines and impacts on biodiversity: A systematic review, *Environmental Impact Assessment Review*, Vol. 71, pp. 110-119, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2018.04.010>
- [4] Kohl, M.T., Messmer, T.A., Crabb, B.A., Guttery, M.R., Dahlgren, D.K., Larsen, R.T., Frey, S.N., Liguori, S., Baxter, R.J. The effects of electric power lines in the breeding ecology of greater sage-grouse, *PLoS ONE*, Vol. 14, No. 1, pp. 1-25, 2019. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0209968>
- [5] Richardson, M.L., Wilson, B.A., Aiuto, D.A.S., Crosby, J.E., Alonso, A., Dallmeier, F., Golinski, G.K. A review of the impact of pipelines and power lines on biodiversity and strategies for mitigation. *Biodiversity and Conservation*, Vol. 26, pp. 1801-1815, 2017. <https://doi.org/10.1007/s10531-017-1341-9>
- [6] Građani niškog naselja Brzi Brod sprečili radnike EMS da kopaju rupe za dalekovod, policija izašla na mesto protesta, 2022. <https://www.danas.rs/vesti/drustvo/gradjani-niskog-naselja-brzi-brod-sprečili-radnike-ems-da-kopaju-rupe-za-dalekovod-policija-izasila-na-mesto-protesta/> [pristupljeno 03.04. 2023]
- [7] Steel materials prices surge as impact of Ukraine war bites. <https://www.building.co.uk/news/steel-materials-prices-surge-as-impact-of-ukraine-war-bites/5117546.article> [pristupljeno 03.04. 2023]
- [8] A.d. Elektromreža Srbije. Plan razvoja prenosnog sistema Republike Srbije za period 2021. - 2030. godine. <https://ems.rs/wp-content/uploads/2022/07/Plan-razvoja-prenosnog-sistema-2.pdf> [pristupljeno 15.04. 2023. godine]
- [9] Zhang, L., Li, Q., Wang, Z., Liu, H., Li, Z., Gui, Y., Kletzli, R., Yang, X., Chen, S., Liu, Y. Lidar application in selection and design of power line route, in *Proc. 2007 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, Barcelona, Spain, pp. 3109-3111, 23-28 July 2007. <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2007.4423502>
- [10] Khan, L.A., Naik, K., Ahmed, M., Al-Tekreeti, M. Ranking of routes for electrical transmission lines using GIS and image processing techniques, in *Proc. 2019 IEEE Electrical Power and Energy Conference (EPEC)*, Montreal, Canada, pp. 1-8, 16-18 October 2019. <https://doi.org/10.1109/EPEC47565.2019.9074782>
- [11] Eroglu, H., Aydin, M. Optimization of electrical power transmission lines' routing using AHP, fuzzy AHP, and GIS. *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*, Vol. 23, pp. 1418-1430, 2019.

<https://doi.org/10.3906/elk-1211-59>

- [12] Franken, M., Barrios, H., Schrief, A.B., Puffer, R. Transmission expansion planning considering detailed modeling of expansion costs, in Proc. *IEEE 2019 Milan PowerTech*, Milano, Italy, pp. 1-6, 23-27 June 2019. <https://doi.org/10.1109/PTC.2019.8810437>
- [13] Vidyashri, M.H. Breadth-first search example advantages and disadvantages. <https://www.vtupulse.com/artificial-intelligence/breadth-first-search-example-advantages-and-disadvantages/> [pristupljeno 08.04. 2023]
- [14] Platforma sa topografskim mapama. <https://en-bw.topographic-map.com> [pristupljeno 08.04. 2023]
- [15] ACER. Report on unit investment cost indicators and corresponding reference values for electricity and gas infrastructure, Version 1.1. 2015. <https://acer.europa.eu/news-and-events/news/acer-publishes-report-unit->

[investment-costs-indicators-and-corresponding-reference-values-european-energy-infrastructure](#) [pristupljeno 08.04. 2023]

#### AUTORI/AUTHORS

**msr Vladan Ristić** - mast. inž. elektr. i računar., Akcionarsko društvo „Elektromreža Srbije” i Elektrotehnički fakultet Univerziteta u Beogradu, vladagenius.vr@gmail.com, ORCID [0000-0001-9571-3238](#)

**dr Darko Šošić**, Elektrotehnički fakultet Univerziteta u Beogradu, sasic@etf.bg.ac.rs, ORCID [0000-0001-9029-8979](#)

**msr Dragana Ristić** - mast. inž. elektr. i računar., Projektni biro i usluge „AL & SA” d.o.o. Pančevo, dragana.ristic@alisadoo.rs, ORCID [0000-0002-3516-4457](#)