

Električni automobil sa integrisanim fotonaponskim sistemom

Electric vehicles with integrated pv system

Vladimir Antonijević*, Željko Đurišić*

* Elektrotehnički fakultet, Beograd

Apstrakt- Rad se bavi modelovanjem i analizom efekata integracije fotonaponskih sistema u elemente karoserije električnih vozila. Cilj rada je bio da se sagledaju kapaciteti, mogućnosti i efekti lokalne proizvodnje električne energije kod realnih električnih automobila. S obzirom na složenu geometriju vozila i njegovu mobilnost, ovaj zadatak je predstavljao relativno kompleksan inženjerski izazov. Razvijen je matematički model u softveru MATLAB koji omogućava procenu vremenskog dijagrama proizvodnje fotonaponskih panela integrisanih u pokretne objekte složene geometrije. Na osnovu realnih mernih podataka o iradijaciji za više lokacija u Srbiji izvršene su analize i proračunati energetski bilansi električnih vozila sa i bez integrisanih fotonaponskih panela u karoseriju automobila. Rezultati rada pokazuju ekonomsku opravdanost primene ovog rešenja u automobilskoj industriji. Osim lokalne proizvodnje čiste energije, postižu se i efekti povećane autonomije vozila i veći domet, ređe posećivanje stanice za punjenje, manja zavisnost i manji uticaj vozila na EES.

Ključne reči- fotonaponski sistemi, električna vozila, dinamički model, lokalna proizvodnja

Abstract - The paper deals with the modeling and analysis of the effects of integrating photovoltaic systems into the body elements of electric vehicles. The aim of this paper was to examine the capacities, opportunities and effects of local electricity generation in real electric cars. Given the complex geometry of the vehicle and its mobility, this task posed a relatively complex engineering challenge. A mathematical model in MATLAB software has been developed that enables the estimation of the time diagram of photovoltaic panels production integrated into moving objects of complex geometry. Based on real irradiation measurement data for several locations in Serbia, analyses and calculations of the energy balances of electric vehicles with and without integrated photovoltaic panels in the car body were carried out. The results of the paper show the cost effectiveness for the application of this solution in the automotive industry. In addition to the local production of clean energy, the effects of increasing vehicle autonomy and longer range, less frequent visit to the charging station, less dependency and less impact of vehicles on power system are also achieved.

Keywords - dynamic model, electric vehicles, local generation, photovoltaic systems

I. UVOD

Među najvećim izazovima poslednjih godina izdvaja se potreba za smanjivanjem emisije štetnih gasova koji doprinose formiranju efekta staklene bašte, što je praćeno globalnim zagrevanjem i ozbiljnim klimatskim promenama. Najveći doprinos globalnom zagrevanju je gas CO₂, koji nastaje i kao posledica sagorevanja fosilnih goriva. U tom smislu, značajan udeo u emisiji gasa CO₂ sigurno ima sektor transporta, i samo za Evropsku Uniju iznosi oko 30%.

Većina razvijenih zemalja i EU su se direktivom 2009/28/EC [1] (doneta 23. aprila 2009. godine) obavezale na značajno smanjenje emisije gasova staklene bašte. Prema pomenutoj direktivi države su se obavezale da se, u odnosu na zabeležene vrednosti iz 1990. godine, do 2020. godine realizuju:

- 1) smanjenje ukupne emisije CO₂ gasova za 20%
- 2) poboljšanje energetske efikasnosti za 20%
- 3) udeo proizvodnje električne energije iz OIE od 20%
- 4) udeo energije iz obnovljivih izvora u transportu od 10%

Sektor transporta svakako ima veliki udeo u ukupnoj emisiji CO₂ gasova. Stalno rastući zahtevi za smanjivanjem globalnog zagrevanja i nastalih klimatskih promena sa jedne strane, kao i iscrpljivanje izvora fosilnih goriva sa druge strane, predstavljaju glavne razloge za permanentna istraživanja i razvoj u oblasti električnih vozila. Masovna upotreba električnih vozila doprinosi povećanju energetske efikasnosti i smanjuje zavisnost transportnog sektora od fosilnih goriva. Sa druge strane treba imati u vidu i činjenicu da je sektor transporta u velikoj meri zavisan od prilika na svetskom tržištu nafte koje po pravilu karakteriše nestabilnost cena. Takva nestabilnost svakako negativno utiče na energetsku sigurnost sektora transporta. U tom smislu je upotreba električnih vozila prepoznata kao jedan od značajnih činilaca uspostavljanja dugoročne energetske stabilnosti sektora transporta, pre svega imajući u vidu visok stepen razvoja tehnologije njihove proizvodnje, nisku cenu energije i već postojeću infrastrukturu za distribuciju električne energije. Pri tome treba uzeti u obzir i činjenicu da se kod većine zemalja, uključujući i našu, najveći deo energije još uvek dobija sagorevanjem fosilnih goriva, tako da praktično pravi uticaj upotrebe električnih vozila na smanjenje zagađenja treba

sagledati kroz prizmu električne energije proizvedene iz obnovljivih izvora.

Težnja proizvođača automobila je razvoj električnih vozila (EV), poput ličnih automobila, autobusa za javni prevoz, dostavnih vozila. Činjenica je da je njihova cena još uvek značajno veća od ekvivalentnih modela sa motorom sa unutrašnjim sagorevanjem, ali se uvode razne subvencije za kupovinu ovih vozila (npr. oslobađanje od plaćanja poreza). U budućnosti se očekuje masovna proizvodnja i upotreba vozila na električni pogon, što bi uz dalji razvoj tehnologije, trebalo da dovede do značajnijeg pada cena vozila na električni pogon.

Ipak, ne treba zanemariti efekte koje će EV imati na elektroenergetski sistem. Naime, napredak tehnologije proizvodnje električnih vozila doveo je do pojave tzv. „plug-in“ hibridnih električnih vozila i čisto električnih vozila kod kojih je predviđeno da se baterije dopunjavaju električnom energijom direktno iz električne mreže. U tom smislu moguće je posmatrati dva aspekta uticaja električnih vozila na EES:

1) pozitivnog – kroz korišćenje baterija električnih automobila kao vida skladištenja električne energije i učešće u pomoćnim uslugama (sekundarna regulacija učestanosti);

2) negativnog – kroz potencijalno preopterećenje pojedinih elemenata mreže, povećanje gubitaka aktivne i reaktivne energije, narušavanje naponskih prilika, stabilnosti sistema, i kvaliteta električne energije (pojave viših harmonika napona i struje, propada napona, fazne nesimetrije).

II. OPIS SAVREMENIH TEHNOLOGIJA KORIŠĆENJA ELEKTRIČNIH VOZILA

Glavna prednost vozila sa SUS motorom (motorom sa unutrašnjim sagorevanjem) je autonomija, odnosno sa rezervoarom napunjenim gorivom se sa trenutnom tehnologijom mogu savladati veće distance u odnosu na EV. Međutim, kako se broj vozila sa SUS motorima povećavao, tako su se sve više ispoljavale i njihove negativne karakteristike. Naime, kvalitet i zagađenje vazduha, nivo buke, ograničenost rezervi nafte – samo su neki od razloga koji su podstakli istraživanje na globalnom nivou radi pronalaska alternative SUS motorima.

Osnovni tipovi električnih vozila su [2]:

A. Hibridna električna vozila (HEV)

Hibridna električna vozila su vozila koja za pokretanje koriste dva ili više izvora energije. Najčešće se pored motora sa unutrašnjim sagorevanjem, za kretanje koristi i električni motor, koji se napaja energijom iz baterije dobijene radom SUS motora. Ova vrsta vozila predstavlja srednji stepen elektrifikacije. Postoje dve podele hibridnih električnih vozila: po autonomnosti električnog pogona (delimični hibrid, potpuni hibrid) i po tipu hibridnog pogonskog sistema (serijski hibrid, paralelni hibrid, serijsko-paralelni hibrid).

B. Hibridna električna vozila sa punjenjem (PHEV)

Dalji napredak hibridnih vozila se ogledao u mogućnosti dopunjavanja baterije direktno iz električne mreže. Ovakva hibridna električna vozila kombinuju dva izvora energije u zavisnosti od stanja napunjenosti baterije (*engl. SoC – State of Charge*): električnu energiju iz baterije i konvencionalna goriva. Ova vozila rade na električni pogon, koji je kod njih primaran

pogon, kada je baterija puna ($SoC > 80\%$). U suprotnom, pogon preuzima motor sa unutrašnjim sagorevanjem i vozilo troši konvencionalno gorivo. To se uglavnom dešava kada je potrebno da vozilo pređe duže distance, čime se prevazilazi zavisnost od infrastrukture za punjenje električnih vozila. „Plug-in“ hibridno vozilo je pogodno za svakodnevno prelaženje manjih udaljenosti, kao što je gradska vožnja, jer se na taj način može potpuno ili delimično izbeći korišćenje motora sa unutrašnjim sagorevanjem, a to je i glavna prednost ovakvih vozila, jer se smanjuje emisija štetnih gasova u atmosferu u gradskim sredinama.

C. Električna vozila sa baterijama (BEV)

Električna vozila sa baterijama predstavljaju potpunu elektrifikaciju transporta. Za razliku od hibridnih i „plug-in“ hibridnih vozila, ovaj tip vozila se pokreće isključivo elektromotorom i ne poseduje motor sa unutrašnjim sagorevanjem. Kod ovih vozila pogonska snaga se u potpunosti dobija korišćenjem uskladištene električne energije. Konverzija električne energije u mehaničku, koja je potrebna za kretanje električnog vozila, vrši se pomoću elektromotora. Za potrebe skladištenja električne energije najčešće se koriste akumulatorske baterije, koje su i najslabija tačka ovakvog vida vozila iz razloga mogućnosti „ostajanja na putu“ zbog iscrpljivanja baterija, kao i same cene istih.

III. ELEKTRIČNI AUTOMOBILI SA INTEGRISANIM FOTONAPONSKIM SISTEMOM

Kako je tehnologija solarnih ćelija napredovala, posebno u segmentu poboljšanja efikasnosti ćelije, tako se u automobilskoj industriji počelo razmišljati o integraciji solarnih ćelija na karoseriju automobila. Prvi primeri realizacije ove ideje datiraju iz 2009. godine, kada je *Toyota* predstavila model *Prius* treće generacije. Generisana solarna energija nije bila namenjena punjenju glavne baterije vozila korišćene za pogon, već se solarni „krov“ koristio za napajanje pomoćne elektronike (unutrašnje osvetljenje, kontrolna tabla, displej) i klima uređaja preko sekundarne baterije.

A. Toyota Prius

Novi *Toyotin* model *Priusa* (*Prius PHV*) iz 2016. godine prvi koristi solarni krov za punjenje pogonske baterije. Opcija dopunjavanja baterije sa punjača je zadržana. Upotrebene su monokristalne ćelije efikasnosti 22,5%. Formirani krovni panel je naznačene snage 180 Wp, koji dnevno može generisati oko 6 kilometara ekvivalentne vožnje (pri vedrom, letnjem danu). Iako ovo ne predstavlja neku veliku vrednost, inspirisalo je dalju implementaciju ovakvog sistema sa još efikasnijim ćelijama.

U julu 2019. godine je *Toyota* objavila da testira implementaciju potpunog prekrivanja površine karoserije. Izabrane su troslojne (*triple-junction*) ćelije sa jedinjenjima InGaP, GaAs i InGaAs veoma velike efikasnosti od 34%. Ćelije su fleksibilne, što omogućava postavljanje ćelija na zaobljenim delovima karoserije test vozila, uključujući krov, haubu i vrata gepeka. Naznačena zbirna snaga svih ćelija iznosi 860 Wp, gotovo 5 puta više u odnosu na prošli model. Rezultati testa još uvek nisu objavljeni, ali *Toyota* procenjuje da se sa ovim sistemom može dodati oko 44,5 km potpuno solarno generisane energije dnevno. Kompanija se još uvek nije izjašnjavala da li razmišlja o serijskoj

proizvodnji ovakvog vozila. Dosta faktora je u igri koji će odrediti dalju sudbinu ovog automobila, među kojima su najdominantniji: cena ovakvih ćelija, potencijalne poteškoće sa integracijom ćelija u karoseriju, kompromis između žrtvovanja zadnjeg stakla zarad dobijanja veće površine ćelija, izmerena realna proizvedena energija itd.

B. Startup kompanije

U svetlu napretka u tehnologiji solarnih ćelija, posebno u treći za postizanje što veće efikasnosti, dva startapa su odlučila da maksimalno optimizuju vozilo i sve podrede postavljanju što veće površine pod solarnim ćelijama. U pitanju su Sono motors, nemački startap, i Lightyear, holandska kompanija koju su osnovali studenti Univerziteta iz Ajndhovena, trostruki uzastopni pobednici međunarodnog takmičenja „World Solar Challenge”.

1) Sono motors

Sono motors [3] je 2017. godine objavio funkcionalan prototip svog prvog modela *Sion*, koji će ući u proizvodnju najavljenju za 2020. godinu. Inženjeri su se pobrinuli za postavljanje ćelija ne samo na vodoravnim površinama, već i na vertikalnim, bočnim vratima. Koriste monokristalne silicijumske ćelije koje formiraju 330 „mini” modula ukupne površine 7,5 m². Efikasnost ovakve površine je 24%, sa vršnom snagom od 1208 Wp. To bi u Centralnoj Evropi bilo dovoljno za dnevnu proizvodnju ekvivalentnu 30 km pređenih ovim automobilom pri vedrom letnjem danu, dok bi prosek za celu godinu iznosio oko 10 km ekvivalentne novodobate energije iz panela po danu. Dizajniran je kao hečbek, po tipu je totalno električno vozilo (električno vozilo na baterije) i pogoni se trofaznim asinhronim motorom snage 120 kW iz baterije kapaciteta 40 kWh. Iako proizvodnja još uvek nije počela, preko 10.000 korisnika je već rezervisalo ovaj model.

2) Lightyear

Lightyear [4] je kompanija za koju se očekuje da može izazvati promenu paradigme i pravila na tržištu (solarnih) automobila. Prototip modela *One* je predstavljen u junu 2019. godine. Po dizajnu je liftbek (hečbek sa horizontalnijim zadnjim vratima). Specifičnim dizajnom automobila je postignut najmanji koeficijent otpora vazduha (*Drag Coefficient*) od svih trenutnih modela na tržištu, $C_D = 0,2$. Da bi se dodatno smanjio uticaj otpora vazduha kretanju (pri većim brzinama svi ostali otpori se mogu zanemariti u odnosu na ovaj, čija je zavisnost od brzine kvadratna) snižena je visina vozila na 1,42 m, što je smanjilo površinu profila koje vozilo pravi krećući se kroz fluid (vazduh). Kako bi vozilo bilo što laganije korišćeni su materijali poput aluminijuma i ugljeničnih vlakana. Takođe nezavisni električni pogon svakog točka (AWD) daje uštedu energije i prevenciju od proklizavanja. Kada se sve ovo uzme u obzir dolazi se do zadivljujuće ekonomičnosti ovog vozila koje konzumira svega 8,3 kWh/100 km (poređenja radi, *Tesla Model 3* „troši” 16 kWh/100 km). U planu je baterija od 60 kWh, koja daje autonomiju od 725 km (po WLTP standardu). Tipovi korišćenih solarnih ćelija su još uvek nepoznanica, ali je kompanija objavila da njihove ćelije imaju i do 20% veću efikasnost od konvencionalnih. Površina svih panela je 5 m² pa leti dodaju oko 60 pređenih kilometara ekvivalentne energije dnevno. Prve isporuke se očekuju 2021. godine.

IV. SPECIFIČNOSTI INTEGRACIJE FOTONAPONSKOG SISTEMA U KAROSERIJU AUTOMOBILA

Kako bi se izvršila kvantifikacija efekata lokalne proizvodnje na automobilu, mora se doći do modela automobila. Problematika bi se najkraće mogla opisati kao integracija dva već postojeća elementa (fotonaponski sistem i automobil) u jednu celinu („solarni automobil“). Međutim, postavlja se pitanje koju ćeliju odabrati, kakav tip karoserije automobila bi bio najoptimalniji itd. Stoga se mora izvršiti analiza pojedinosti ovakve celine.

A. Izbor fotonaponske ćelije

Specifičnost ovakve primene je ograničena dostupna površina za postavljanje tih ćelija. Stoga se ne ide na stranu što jeftinije ćelije po vatu instalisane snage, već na stranu povećane efikasnosti ćelija.

Za primenu se mora odabrati neki već ispitani i relativno dugo dostupni tip ćelije na tržištu. Cilj ovde nije eksperimentisanje sa superefikasnim ćelijama, jer se one još uvek nisu pokazale i dokazale kao pouzdane u nekoj primeni, već im je efikasnost merena u laboratorijskim uslovima koji odstupaju od uslova realne eksploatacije. Cilj takođe nije ni ispitivanje teorijskih granica ovakvog vozila. Cilj je predložiti šta bi se moglo trenutno konstruisati i na takvom modelu ispitivati uticaj lokalne proizvodnje energije na performanse vozila.

Osim visoke efikasnosti, ćelija zbog specifičnosti primene mora ispuniti još neke uslove. Ceo fotonaponski sistem mora da bude lagan. Ako bi, u suprotnom, bio težak, postoji opasnost od gubljenja benefita takvog sistema, jer će se javiti povećani zahtevi za potrošnjom energije koji čak mogu da pređu energiju proizvodnje sistema. Na tržištu se taj problem rešio tako što se kao supstrat prilikom izrade ćelije umesto stakla koristi plastični film. Na taj način se postiže smanjenje težine ćelije i do 8 puta. Tako proizvedena solarna ćelija je i fleksibilna, što je bitna karakteristika pri pokrivanju blago konveksnih delova karoserije vozila. Čvrstina i izdržljivost takođe moraju biti uzeti u obzir. Korisnici vozila su prethodno stekli neke navike ponašanja prema vozilu. Ako se vozač nasloni na haubu automobila, ćelija mora biti u stanju da podnese taj pritisak. Udar kamenčića prilikom vožnje se takođe mora tolerisati. Na kraju takav sloj mora da ima minimalan koeficijent refleksije sunčevih zraka.

Predložena ćelija koja najbolje ispunjava gore pomenute karakteristike je troslojna (*triple-junction*) ćelija kompanije *Sharp* načinjena od jedinjenja InGaP, GaAs i InGaAs. Efikasnost ove ćelije dostiže 34%. Upravo ove ćelije su ugrađene u pređašnje pomenuto *Toyotino* test vozilo. Kada formiramo modul povezivanjem više ovakvih ćelija, rezultatna efikasnost će iznositi 31%. Smanjenje efikasnosti modula u odnosu na ćeliju se javlja usled blage razlike u strujno-naponskim karakteristikama svake od ćelija, usled postojanja graničnih površina ćelija koje nisu izrađene od fotonaponskog materijala, i usled drugih kompleksnijih pojava.

B. Izbor optimalnog tipa karoserije i pozicioniranje solarnih modula na automobilu

Površina na kojoj se mogu postaviti moduli je ograničena, pa je potrebno obezbediti što veću površinu dostupnu za postavljanje

panela. Takođe treba voditi računa i o postizanju što boljih nagibnih uglova tako formiranih panela.

Uzimajući prethodno pomenuto u obzir, rešenje koje se nameće se već može sresti kod komercijalnih tipova sa liftbek (*liftback*) karoserijom. Liftbek je tip hedžbeka, kod kog se zadnja vrata (vrata prtljažnika) blago spuštaju nadole. Primer jednog takvog komercijalnog automobila bi bio Audi A7.

Dostupni prostor za postavljanje panela bi bio: hauba, krov, vrata gepeka, i obe bočne strane sa prostorom ispod prozora (vrata) i delovima karoserije iznad pneumatika. Tako bi praktično bilo formirano pet panela. Iz realnih dimenzija automobila proračunate su površine i usvojeni nagibni uglovi svakog pojedinačnog panela. U tabeli 1. su prikazane dobijene površine (S) i nagibni uglovi (Σ) panela.

	S [m ²]	Σ [°]
Bočni paneli	1.728	90
Panel haube	1.311	9
Panel krova	2.427	0
Panel vrata gepeka	1.144	16

Tabela 1. – Površina i nagibni uglovi pojedinih panela

B. Elementi projektovanja automobila za smanjenje sila otpora kretanju

Kako se energija dobija na skup način (efikasni paneli, mala dostupna površina...) mora se i racionalno koristiti, odnosno i sam automobil mora biti isprojektovan da ima što manje otpore pri kretanju. Tako će i potrošnja energije biti manja prilikom vožnje, pa će se moći preći i veća razdaljina sa energijom proizvedenom iz fotonaponskog sistema. Neki od faktora na koje se može uticati prilikom projektovanja su:

1) Smanjenje proizvoda $C_D \cdot A$

C_D je aerodinamički koeficijent otpora a A je površina profila koji automobil pravi krećući se kroz fluid (u ovom slučaju vazduh). Ovako se doprinosi smanjenju potrošnje posebno pri većim brzinama jer je zavisnost sile otpora vazduha od brzine kvadratna, a snage potrebne da savladava taj otpor (koja je proizvod sile otpora i brzine) kubna.

2) Smanjenje mase vozila

Upotrebom laganih ali istovremeno izdržljivih i čvrstih materijala može se smanjiti masa vozila. Pored aluminijuma koji se uveliko koristi, sve češće se za ovu primenu upotrebljavaju ugljeni vlakna. Ovim se smanjuje otpor kretanju usled trenja u ležajevima, trenja usled kotrljanja pogonskog točka, kao i potrebnu snagu prilikom ubrzanja.

3) Korišćenje kvalitetnih pneumatika

Ovim se smanjuje otpor trenja usled kotrljanja pogonskog točka. Ovaj otpor takođe raste prilikom smanjenja pritiska fluida u pneumatiku („meke gume“).

V. IMPLEMENTACIJA U SOFTVERSKOM ALATU

Sada je na osnovu podataka o panelima na automobilu i ulaznih podataka potrebno estimirati proizvedenu energiju.

A. Sprezanje azimutnih uglova pojedinačnih modula sa azimutnim uglom automobila

Jasno je da kretanje automobila u različitim pravcima utiče i na usmerenost svakog panela (njihov azimutni ugao). Medutim, paneli su pričvršćeni za karoseriju automobila pa između ovih veličina postoji međusobna veza. Ukoliko se kao referentna osa automobila proglašava dužinska osa (osa sa pravcem od zadnjeg ka prednjem delu automobila, paralelna levom (ili desnom) paru točkova), usmerena ka prednjem delu vozila, ugao koji zaklapa ta referentna osa sa osom sever-jug (usmerena ka jugu) nazivaće se azimutni ugao automobila. Po konvenciji se može usvojiti da je taj ugao pozitivan ako je „usmereni deo“ ose automobila bliži istoku, a negativan ako je bliži zapadu. Sada se azimutni uglovi pojedinačnih pređašnje formiranih panela mogu izraziti u funkciji azimutnog ugla automobila. Na taj način se dobija jedan spregnut sistem po azimutnim uglovima opisan jednim jedinstvenim azimutnim uglom – azimutnim uglom automobila.

Bočni levi panel	$\Phi_{BL} = \Phi_A + 90^\circ$
Bočni desni panel	$\Phi_{BD} = \Phi_A - 90^\circ$
Panel haube	$\Phi_H = \Phi_A$
Panel krova	$\Phi_K = \Phi_A$
Panel vrata gepeka	$\Phi_G = \Phi_A + 180^\circ$

Tabela 2 – Azimutni uglovi pojedinih panela u funkciji Φ_A

Ovakav zapis olakšava implementaciju u nekom od programskih alata jer se sada prostorna orijentacija sistema od pet panela opisuje samo sa jednom promenljivom. U narednim proračunima će se smatrati da se automobil u celini nalazi ili kreće po horizontalnoj površini.

Kada se na ove jednačine pridodaju i trigonometrijske jednačine vezane za geometriju sunce-panel, može se ovakav kompleksan sistem u celini opisati jednačinama u nekom programskom alatu. U tu svrhu je izabran MATLAB®.

B. Ulazni merni podaci

Raspolaže se sa mernim podacima o direktnoj (I_B) i difuzionoj (I_{DH}) komponenti sunčevog zračenja za celu godinu sa satnom rezolucijom (8760 parova vrednosti) za lokaciju Grada Beograda – ovi podaci nam predstavljaju ulaz za proračun.

VI. ANALIZA EFEKATA LOKALNE PROIZVODNJE NA PERFORMANSE ELEKTRIČNOG AUTOMOBILA

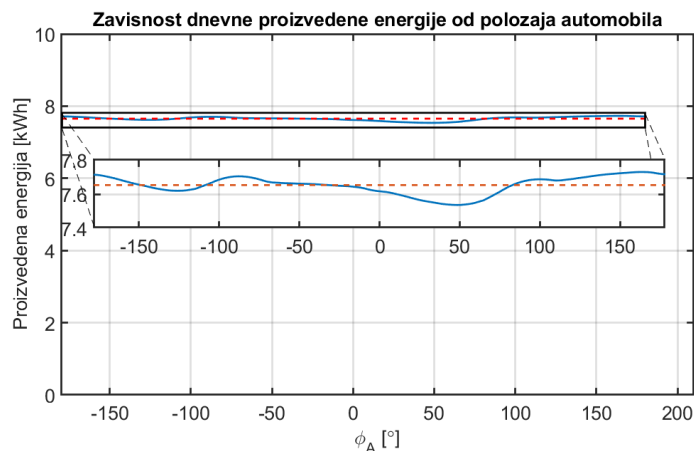
Cilj ovog rada je da se odredi kakav uticaj integrisani fotonaponski sistem ima na performanse električnog automobila i komparativnom analizom utvrde potencijalni benefiti u odnosu na električni automobil bez ovakvog sistema. Komparativna analiza električnog automobila sa i bez integrisanog fotonaponskog sistema će se vršiti pod sledećim uslovima:

1. Snage električnih motora su iste
2. Kapaciteti baterija su isti
3. Trasa koju ovi automobili prelaze je identična
4. Mase ovih vozila su približno jednake
5. Aerodinamički oblik se nije bitno promenio

Kvantifikacija efekata fotonaponskog sistema može se izvršiti tako što se dâ podatak o prosečnoj dnevnoj proizvedenoj količini

energije fotonaponskog sistema. Međutim taj podatak nije praktičan na tržištu i u marketingu. Mnogo zgodniji podatak sa kojim je većina korisnika familijarnija je izražavanje te energije u formi pređenih kilometara. Tako se u ovoj novoj grani automobila već sreću formulacije koje daju informaciju koliko dnevno pređenih kilometara korisnik može da očekuje sa tom energijom. Za konverziju iz energije u pređene kilometre potreban je podatak o prosečnoj potrošnji energije automobila po pređenom putu. Ta brojka se kod većine električnih vozila kreće između 10 i 20 kilovat-časova na 100 pređenih kilometara. Uvažavajući prethodne napomene prilikom projektovanja kao cilj usmerenom ka uštedi energije, može se očekivati da ova veličina ne prelazi 10 kWh/100 km u proseku, dok se očekuje da na otvorenom putu pri prosečnoj brzini od 100 km/h iznosi 13 kWh/100 km.

Performansa na koju će ovakva modifikacija najviše imati uticaja je autonomija vozila. Kako snaga električnog motora, masa i aerodinamički oblik nisu menjani, ubrzanje ovakvog vozila će ostati isto. Povećanje autonomije se pre svega ogleda u tome da se izlaganjem automobila suncu proizvodi određena energija koja se skladišti u bateriji, nezavisno od toga da li automobil stoji ili se kreće. Još jedan benefit koji se postiže je smanjen broj posećivanja stanica za punjenje električnih automobila. On se može proceniti iz ukupne godišnje proizvedene energije ovog sistema sa jedne strane, i godišnje pređenih kilometara sa druge. Proizvodnja energije zavisi od iradijacije u posmatranom danu. Kako se intenzitet i trajanje iradijacije menja tokom godine, menjaće se i proizvedena energija iz dana u dan. Takođe ona zavisi od azimutnog ugla automobila, odnosno pravca kretanja ili parkiranja istog. Budući da su paneli lepo prostorno raspoređeni sa svih strana, ovaj uticaj je minimizovan. Na slici 1. se može videti zavisnost prosečno dnevno proizvedene energije od azimutnog ugla automobila.



Slika 1. – Zavisnost dnevno proizvedene energije od položaja automobila

Relativna vrednost odstupanja proizvedene energije pri najpovoljnijem i najnepovoljnijem položaju je svega 2,5% (u odnosu na srednju vrednost proizvedene energije) što je izrazito malo, pa vozač ne mora da brine kako bi bilo najbolje usmeriti automobil za postizanje što veće proizvodnje.

Proizvodnja takode zavisi i od dana u godini. Da bi se shvatile razmere te zavisnosti, uzeta su četiri meseca u svakom godišnjem dobu (januar, april, jul i oktobar), azimutni ugao automobila je postavljen na nulu (automobil je južno orijentisan) i za svaki mesec je proračunata srednja dnevna proizvodnja, faktor kapaciteta (engl. *Capacity Factor* – *CF*) i satna zavisnost proizvedene snage. Srednje dnevne vrednosti u svakom mesecu su prikazane u tabeli 3.

Na slikama 3 do 8 su prikazani grafici proizvodnje pojedinih panela za prosečan dan u julu. Ono što možemo da uočimo je da se leva i desna bočna strana dobro komplementiraju, odnosno proizvode značajnije količine energije u različitim periodima dana, što u zbiru daje dobro izbalansiranu dnevnu proizvodnju ova dva panela.

Prethodno je usvojena srednja potrošnja automobila na 100 kilometara. Sada je moguće da se energija dobijena u ovim mesecima prevede u pređeni put. Za januar bi se imalo dnevno dodatih 27 km usled sunčane energije. U prosečnom aprilskom danu bi to iznosilo 93,5 km. Prosečan julski dan obezbeđuje 133 km dodatne autonomije, dok se u oktobru može očekivati 60 km. Ukoliko bi automobil bio cele godine izložen pod nebom, ukupna godišnja proizvedena energija bi iznosila 2780 kWh, sa kojom se može preći put u iznosu od 27.800 km, što je značajno više od prosečnog godišnjeg pređenog puta automobila u Srbiji koji iznosi između 10 i 12 hiljada kilometara.

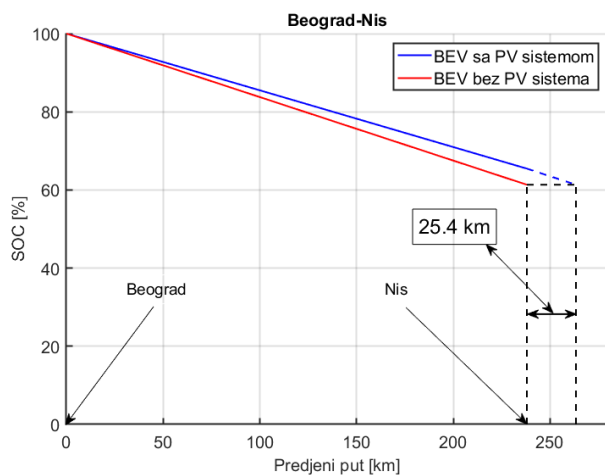
Mesec	Dodata energija [kWh]	Povećanje autonomije [km]
Januar	2,69	26,9
April	9,35	93,5
Jul	13,3	133
Oktobar	6	60

Tabela 3 – Srednja dnevna proizvedena energija po mesecima

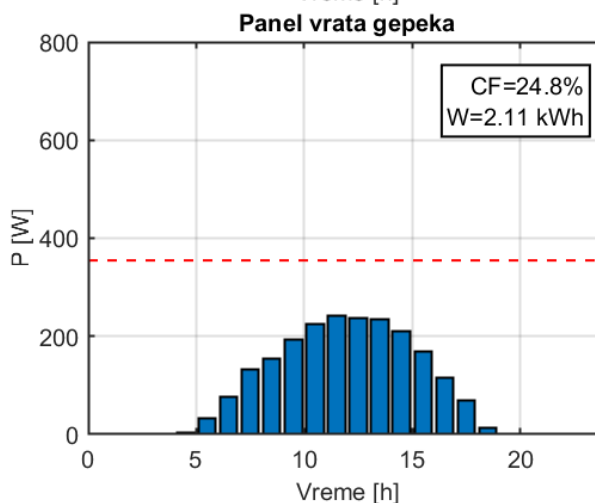
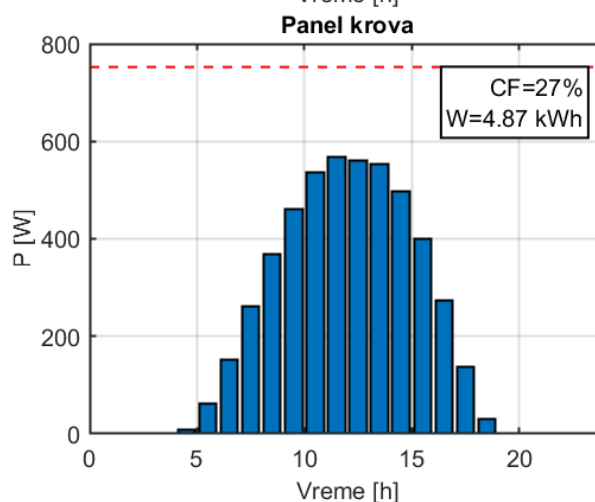
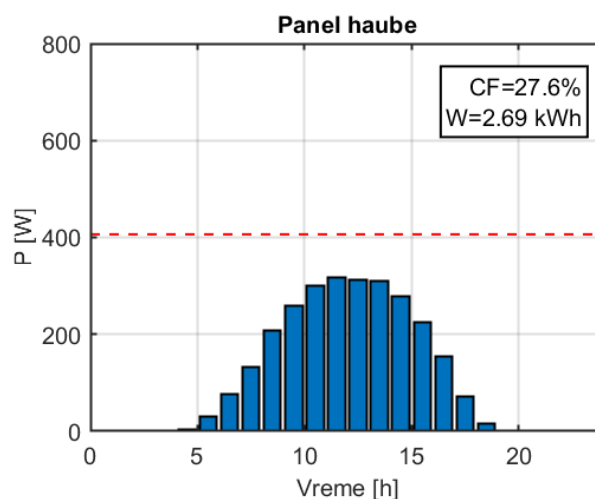
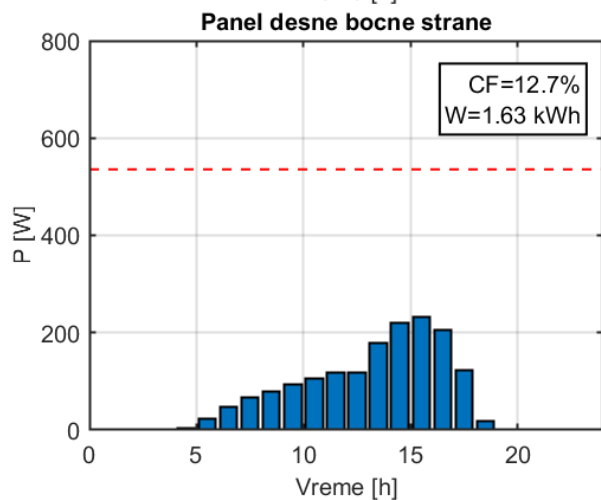
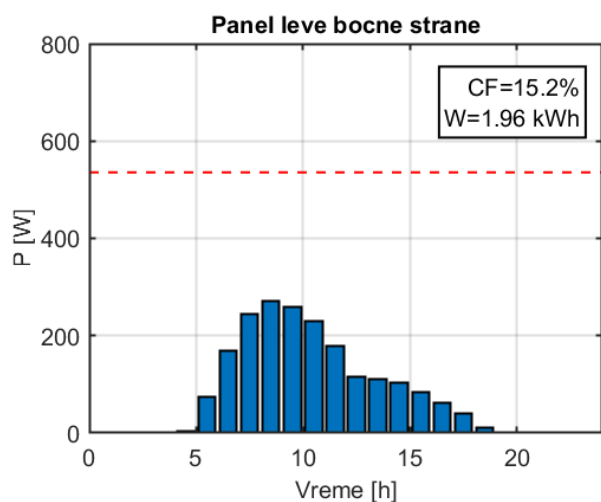
VII. SIMULACIJA – AUTO-PUT BEOGRAD-NIŠ

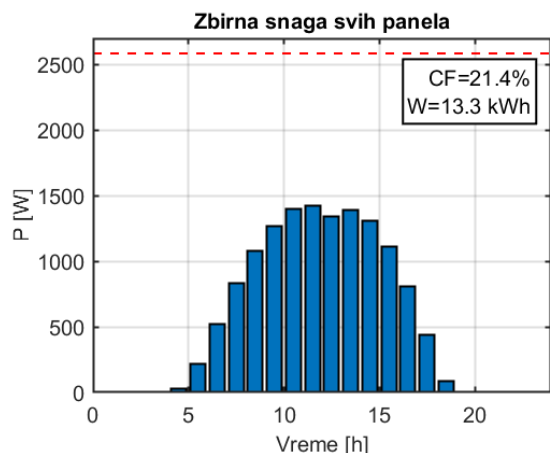
Kao što je ranije napomenuto, sunčana energija se može iskorišćavati i dok je automobil u pokretu. Da bi se uočilo kolika je ta energija dok vozilo prelazi određenu deonicu, urađena je simulacija za trasu auto-puta Beograd-Niš. Dužina puta između ova dva grada iznosi 238 km, a usvojena je prosečna brzina kretanja vozila od 100 kilometara po času. Smatraće se da automobil ne menja svoj azimutni ugao, koji je određen vazдушnim pravcem Beograd-Niš. Iz podataka o geografskoj širini i dužini ova dva grada se može odrediti azimutni ugao tog pravca i on je jednak $34,62^\circ$ pa je i azimutni ugao automobila fiksiran na tu vrednost tokom cele deonice. Početak putovanja je planiran za 1. jul u 12 časova. Kako putovanje traje 2,38 časa, očekivani dolazak u Grad Niš je u 14 časova i 23 minuta. Za vreme putovanja, automobil stalno dopunjava svoju bateriju određenom snagom. Iz konkretnih vremenskih i podataka o iradijaciji za taj dan i ta tri časa (treći čas se uzima sa težinskim faktorom od 0,38) određena je ukupno proizvedena energija i ona iznosi 3,3 kilovat-časa. Za ovu prosečnu brzinu je ranije usvojena potrošnja energije po pređenom putu (13 kWh/100 km) pa će se na savladavanje trase utrošiti 30,9 kWh. Baterija je kapaciteta 80 kWh pa će njeno stanje napunjenosti (engl. *State of Charge* – *SoC*) za automobil bez fotonaponskog sistema biti 61,33% dok će za automobil sa integrisanim takvim sistemom ono iznositi

65,45%. Za tu razliku energije, koja je jednaka proizvedenoj energiji fotonaponskih panela tokom putovanja, može se preći dodatnih 25,4 km. Na ovaj način je direktno pokazano uvećanje autonomije koju ovakav automobil može ostvariti po sunčanom danu. Na slici 2 je ovo uvećanje autonomije grafički prikazano.



Slika 2. – Grafički prikaz simulacije





Slika 3 do 8 – Proizvodnja pojedinih i zbirna proizvodnja panela

ZAKLJUČAK

U ovom radu je urađena estimacija proizvodnje energije električnog automobila sa integrisanim fotonaponskim sistemom na osnovu konkretnih mernih jednogodišnjih podataka o iradijaciji za lokaciju Grada Beograda. Pažljivo su određene karakteristike automobila i fotonaponskog sistema u ovoj aplikativnoj izvedbi kako bi se dalje mogli analizirati benefiti ovako formiranog vozila.

Rezultati pokazuju jak potencijal za primenu ovog rešenja u automobilske industriji. Posledica je čisto dobijena energija, povećanje dometa vozila, ređe posećivanje stanice za punjenje, manja zavisnost i manji uticaj vozila na EES. Ograničenje primene se javlja u uslovima čestih i dugih zaklonjenosti sunčevih zraka automobilu. Dostupna površina se može dodatno optimizovati, ali je njena vrednost ograničena dimenzijama automobila. Očekuje se da se u budućnosti na tržištu pojave ćelije veće efikasnosti, kao i da će cena ovakvih ćelija značajno pasti, što bi ovu primenu učinilo još rentabilnijom. Dobijena godišnje proizvedena energija predstavlja snažan impuls za implementaciju na automobilima.

Primena sličnih rešenja je moguća i na drugim tipovima vozila koja učestvuju u transportu. Autobusi i kamioni bi mogli biti opremljeni ovim sistemom što bi značajnije doprinelo dekarbonizaciji. Reklo bi se da je kod njih odnos dostupne površine za postavljanje sistema i potrošnje energije po pređenom putu veći, što bi uvećalo benefite ove distribuirane proizvodnje energije.

REFERENCES

- [1] Directive 2009/28/EC of the European Parliament and of the Council of 23 April 2009 on the promotion of the use of energy from renewable sources and amending and subsequently repealing Directives 2001/77/EC and 2003/30/EC
- [2] Ottorino Veneri, Technologies and Applications for Smart Charging of Electric and Plug-in Hybrid Vehicles, Springer, 2017.
- [3] <https://sonomotors.com/>
- [4] <https://lightyear.one/>

AUTORI

Prvi Autor – Vladimir Antonijević, dipl. inž. el. i rač., Elektrotehnički fakultet, av193270m@student.etf.bg.ac.rs

Drugi autor – prof. dr Željko Đurišić, Elektrotehnički fakultet, djurisic@etf.rs

Autor za korespondenciju – Vladimir Antonijević, av193270m@student.etf.bg.ac.rs, 065/243-0388

ZAHVALNICA

Rad nastao tokom istraživanja finansiranih od strane Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja