

Analiza isplativosti ugradnje fotonaponskih sistema kod kupaca-proizvođača u Njemačkoj

Miloš Janković, Čedomir Zeljković, Predrag Mršić

Univerzitet u Banjoj Luci, Elektrotehnički fakultet, Banja Luka, Republika Srpska
milos.jankovic@student.etf.unibl.org, cedomir.zeljkovic@etf.unibl.org, predrag.mrsic@etf.unibl.org

Sažetak—U radu se razmatra isplativost ugradnje fotonaponskog (PV) sistema u domaćinstvo, čime kupac električne energije stiče status kupca-proizvođača. Posmatra se njemački slučaj koji je karakterističan zbog velikog odnosa cijena kupljene i prodane električne energije. Prvi dio rada posvećen je efektu ugradnje PV sistema, dok se u drugom dijelu analiziraju efekti kupovine električnog vozila (EV) i povećanje isplativosti investicije u PV sistem koje EV prouzrokuje. Konkretno numerički primjer pokazuje da se ugradnja PV sistema u Njemačkoj, pod trenutnim tržišnim uslovima, isplati za 9,88 godina. Prelazak na korišćenje EV u takvim uslovima značajno skraćuje period otplate PV sistema i kreće se između 2,88 i 3,94 godina, u zavisnosti od toga koliko se električne energije iz PV sistema iskoristi za punjenje EV. Pokazuje se da na period otplate PV sistema veći efekat ima zamjena dizel vozila sa EV, nego proizvodnja iz PV sistema.

Ključne riječi—fotonaponski sistemi; električno vozilo; sopstvena potrošnja.

I. UVOD

Elektroenergetski sektor se suočava sa dubokim transformacijama, motivisanim ekološkim razlozima, promjenama na tržištu i konstantnim razvojem tehnologija. U okviru ovih transformacija mogu se identifikovati dva osnovna trenda: samosnabdijevanje energijom i pojava električnih vozila. S jedne strane, distribuirana proizvodnja i skladištenje energije dozvoljavaju pojedinim potrošačima da fleksibilno proizvode i sami troše ili predaju električnu energiju elektroenergetskom sistemu. S druge strane, pojava električnih vozila značajno povećava potrošnju električne energije kod potrošača [1].

Tehnološki razvoj opreme za proizvodnju obnovljive energije, pametne mreže i transportna rješenja omogućavaju potrošačima inovativne načine učestvovanja u tranziciji energetske održivosti u različitim granama industrije. U tom smislu, solarne elektrane i električna vozila predstavljaju reprezentativne tehnologije, sa najvećim stepenom razvoja, koje su istovremeno snažno podržane brojnim pozitivnim propisima i zakonskim regulativama.

Kako su solarne elektrane postale pristupačne za domaćinstva, sve više potrošača energije evoluira u tzv. kupce-proizvođače (engl. *Prosumers*) [2]. Ovaj koncept može da pomogne u očuvanju prirodnog okruženja, pokretanju ekonomskog razvoja i pružanju potrošačima više energetske izbora. Lokalni izvori energije i električna vozila zajedno mogu biti način za minimizaciju emisija štetnih gasova i

korišćenja elektroenergetskog sistema na znatno efikasniji način. Upotrebom električnog vozila, kupac-proizvođač dobija novi alat za bolje korišćenje sopstvenih izvora električne energije.

Postavljaju se pitanja pod kojim uslovima i kome se isplati ugradnja fotonaponskog (engl. *Photovoltaic* (PV)) sistema i kako različiti faktori utiču na period otplate. U ovom radu izvršena je ekonomska analiza ugradnje PV sistema na krov porodične kuće, kao i analiza efekta električnog vozila na povećanje isplativosti investicije u PV sistem. Zbog činjenice da je za preuzimanje energije iz fotonaponskog sistema neophodno da vozilo bude kući i da je potreba za vozilom velika u doba dana sa visokim solarnim zračenjem, rad će pokazati kako se period otplate PV sistema mijenja u zavisnosti od procentualnog udjela proizvedene energije u punjenju električnog vozila.

Rad analizira slučaj Njemačke, kao jedne od vodećih država Evropske unije, koja je među prvim zemljama svijeta donijela zakon o obnovljivim izvorima energije i u kojoj je udio kupaca-proizvođača u elektroenergetskom sistemu veoma veliki i konstantno raste. Njemačka predstavlja specifičan slučaj za analizu i iz razloga što je cijena električne energije oko 5,5 puta viša od *feed-in* tarife za fotonaponske sisteme [3], [4].

II. POSTAVKA PROBLEMA

Za potrebe ovog rada posmatra se domaćinstvo sa četiri člana porodice, povezano na distributivnu mrežu u okolini Štutgarta u Njemačkoj. Prosječna godišnja potrošnja električne energije četvoročlanog domaćinstva u Njemačkoj u 2022. godini iznosila je 5016 kWh [5] i pretpostavlja se ista potrošnja i u 2023. Zbog energetske krize izazvane aktuelnim dešavanjima u svijetu, cijena električne energije je značajno varirala u 2022. godini i u nekoliko navrata dostizala istorijske maksimume, međutim, kao prosječna cijena električne energije u 2022. godini u Njemačkoj uzima se vrijednost 0,35 €/kWh [3]. Prema tome, navedeno domaćinstvo je u 2022. moralo da izdvoji 1737,54 € za električnu energiju. Trenutno, niko sa sigurnošću ne može da predvidi kako će se kretati cijena električne energije u Njemačkoj u 2023., ali su procjene da će prosječna tržišna cijena $c_{p,M}$, biti oko 0,47 €/kWh, što će se uzeti kao podatak za potrebe ovog rada.

Zakon o obnovljivim izvorima energije u Njemačkoj predviđa nekoliko načina subvencionisanja ugradnje PV

sistema i prelazak kupaca električne energije u status kupaca-proizvođača [6]. Jedan od najznačajnijih i nazastupljenijih načina subvencionisanja ogleda se kroz definisanje zagarantovane cijene kilovat-časa $c_{PV,M}$, proizvedenog u PV sistemu, po kojoj će se ta energija prodavati u distributivnu mrežu u narednih 20 godina (tzv. *feed-in* tarifa), pri čemu se kupcu-proizvođaču garantuje pravo prvenstva pri predaji energije u mrežu, tj. garantuje se da će sav višak energije proizvedene u PV sistemu biti prodat u distributivnu mrežu.

Na osnovu gore navedenog načina subvencionisanja, domaćinstvo opisano u radu razmatra instalaciju PV sistema na krov kuće i prelazak u status kupca-proizvođača, pri čemu bi dio sopstvene proizvodnje bio upotrijebljen za pokrivanje potrošnje u domaćinstvu, dok bi se eventualni višak proizvedene energije isporučivao u mrežu po cijeni $c_{PV,M}$, od 0,086 €/kWh, kako je definisano u posljednjoj verziji Zakona o obnovljivim izvorima energije u Njemačkoj. Ostatak potrošnje domaćinstva bi se pokrивao energijom iz distributivne mreže, po tržišnoj cijeni $c_{p,M}$. Krov je orijentisan prema jugu i nagnut je pod uglom od 30°, dok je snaga razmatranog PV sistema 6 kW. U prvom dijelu rada ispituje se isplativost ugradnje opisanog PV sistema.

Zbog pomenute energetske krize došlo je i do velikih poremećaja na tržištu nafte, što je dovelo do poskupljenja goriva za automobile sa SUS motorima, pa je tako cijena dizel goriva porasla sa prosječnih 1,39 €/l na kraju 2021. godine, na 1,79 €/l [7] na kraju 2022. godine, pri čemu je u pojedinim trenucima cijena dizel goriva išla i do 2,20 €/l. Motivisani naglim i nepredvidljivim povećanjem cijene dizel goriva, sa tendencijom rasta i u 2023. godini, članovi domaćinstva razmatraju da umjesto novog dizel vozila (DV), na početku 2023. godine kupe novo električno vozilo (EV) i na taj način povećaju sopstvenu potrošnju električne energije proizvedene PV sistemom. Drugi dio rada treba da pokaže kakav uticaj ima nabavka i upotreba EV umjesto DV na godišnje troškove domaćinstva, kao i na period otplate ugrađenog PV sistema.

III. METODOLOGIJA PRORAČUNA

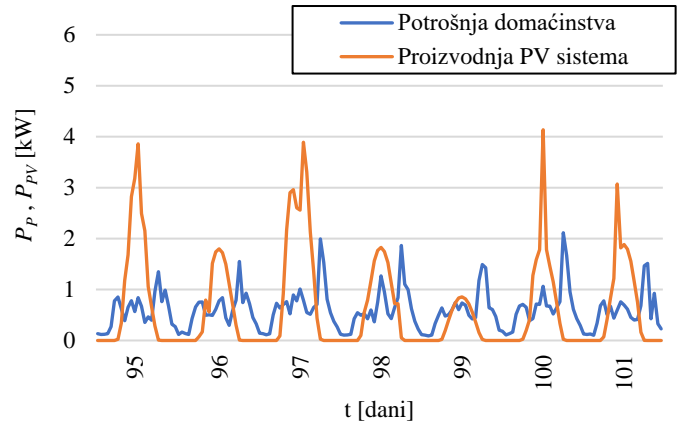
A. Modelovanje potrošnje

Na osnovu podatka o prosječnoj godišnjoj potrošnji električne energije četvoročlanog domaćinstva u Njemačkoj, koristeći programski paket HOMER [8] dobijeni su podaci o satnoj potrošnji domaćinstva (P_p), za cijelu godinu. Za područje na kojem se nalazi Njemačka kao mjesec sa najvećom potrošnjom odabran je januar, kada su ljudi više kući, svjetla se uključuju ranije i moguća je upotreba električne energije za grijanje, dok je za dnevnu potrošnju energije u simulaciji odabrano da ona varira za 10%. Na Sl. 1 prikazan je sedmodnevni dijagram snage potrošnje domaćinstva, pri čemu je dati period odabran proizvoljno i predstavlja period od 5. do 11. aprila, tj. od 95. do 101. dana u godini.

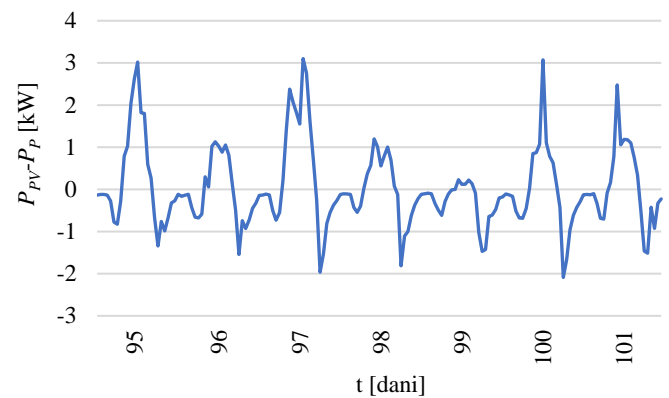
B. Modelovanje proizvodnje PV sistema

Podaci o godišnjoj proizvodnji PV sistema izračunati su metodom tipične meteorološke godine uz pomoć PVWatts kalkulatora američke laboratorije NREL [9]. Na Sl. 1 je prikazan dijagram proizvodnje PV sistema, dok je na Sl. 2

prikazana razlika između potrošnje P_p i proizvodnje PV sistema P_{PV} , gdje se vidi u kojim periodima dana je ta razlika pozitivna, a u kojim negativna.



Sl.1. Sedmodnevni dijagram potrošnje električne energije domaćinstva i proizvodnje PV sistema



Sl.2. Razlika između proizvodnje PV sistema i potrošnje domaćinstva

C. Modelovanje električnog vozila (EV)

Za potrebe ovog rada odabrano je električno vozilo tipa Nissan Leaf 39 kWh N-Connecta [10].

Vozilo se isporučuje sa baterijom kapaciteta 39 kWh, što omogućava vozilu da sa punom baterijom pređe 270 km. Podaci o vozilu dati su u tabeli I, pri čemu su osnovni podaci preuzeti od proizvođača, dok su neki podaci izvedeni na osnovu pretpostavke da je prosječna kilometraža koju vlasnik sa svojim vozilom prelazi u Njemačkoj u toku dana 75 km.

Ovo vozilo je izabrano za analizu jer je jedno od najprodavanijih električnih vozila u Njemačkoj, između ostalog i zbog ne tako visoke cijene za EV. Naime, navedeno vozilo ima mehaničku snagu od 150 KS i pripada C segmentu vozila. Poređenja radi, Škoda Octavia 2022, u osnovnoj opremi, sa dizel motorom snage 150 KS u Njemačkoj košta 35000 € i pripada C segmentu. Na osnovu ovih podataka, opravdano je iz rada izostaviti uticaj cijene novog vozila na godišnje troškove, s obzirom na pretpostavku da će domaćinstvo u 2023. godini svakako zamjeniti postojeće vozilo sa novim.

TABELA I. PODACI O EV

Nissan Leaf 39kWh N-Connecta		
Kapacitet baterije EV	39	kWh
Pređena distanca sa punom baterijom	270	km
80% kapaciteta baterije	31,20	kWh
Pređena distanca sa 80% kapaciteta	216	km
Prosječna dnevna pređena distanca	75	km
Prosječna godišnja pređena distanca	27375	km
Prosječna potrošnja na 100 km	14,44	kWh
Prosječna potrošnja po danu	10,83	kWh
Ukupna godišnja potrošnja $E_{p, EV, g}$	3954,17	kWh
Troškovi punjenja EV u 2023.*	1858,46	€
Cijena vozila (sa uračunatim subvencijama i Wallbox punjačem)	36200	€

*Ako bi se EV punilo isključivo energijom iz elektroenergetske mreže.

Kombinacija električnog vozila i PV sistema predstavlja veoma interesantno rješenje, s obzirom na to da EV posjeduje veliki sistem za skladištenje energije koji, umjesto da za punjenje stalno koristi energiju iz mreže po cijeni $c_{p,M}$, može da sakuplja višak energije iz PV sistema koji bi se u suprotnom prodavao u distributivnu mrežu po cijeni $c_{PV,M}$, koja je oko 5,5 puta niža od $c_{p,M}$. U idealnom scenariju, EV bi za punjenje preuzeo maksimalno moguću količinu energije iz PV, međutim, sa Sl. 1 se vidi da je proizvodnja PV sistema najveća u dijelu dana kada je većina ljudi na poslu i kada je potrošnja domaćinstva relativno niska. Kako EV dnevno u prosjeku prelazi 75 km, jasno je da se sa vozilom putuje na posao i nazad i da nije realno očekivati da će se EV konstantno puniti kod kuće energijom iz PV sistema. Iz tog razloga uvodi se faktor K , kojim se određuje koliki se dio ukupne energije potrebne za punjenje EV u toku godine može pokriti energijom iz PV sistema. Ovaj faktor polazi od 0, što podrazumijeva situaciju da se EV u toku godine nikako ne puni energijom iz PV sistema, tj. sva energija potrebna za punjenje EV u toku godine preuzme se iz distributivne mreže, i raste u zavisnosti od toga koliko se može preuzeti energije za punjenje direktno iz PV sistema, što zavisi od snage PV sistema i načina raspodjele energije dobijene iz PV sistema na potrošnju domaćinstva i punjenje EV. U analiziranom slučaju ispostaviće se da nije realno očekivati da faktor K bude veći od 0,63, dakle, da se energijom iz PV sistema pokrije više od 63% potrebne energije za punjenje EV u toku godine, jer je proračunom, na osnovu godišnjih dijagrama potrošnje domaćinstva i proizvodnje PV sistema, kao i potrebe EV za energijom, pokazano da to predstavlja maksimalnu količinu energije koju EV može preuzeti iz PV sistema snage 6 kW nakon što se pokriju potrebe domaćinstva za električnom energijom. Čak i kada bi PV sistem posjedovao dovoljno energije na raspolaganju da pokrije cjelokupnu potrošnju, ona ne mora biti potpuno iskoristiva ukoliko je, npr. baterija EV već puna jer iz nekog razloga ono nije voženo prethodni dan, ili ako vlasnik nije došao kući u planirano vrijeme i tako ostao bez mogućnosti da puni vozilo energijom koju je taj dan proizveo PV sistem itd. Teoretski, K može da ide do

vrijednosti 1, ako bi se vlasnik odlučio da EV prioritetno uzima proizvedenu energiju cijele godine i tako za punjenje preuzme svu potrebnu raspoloživu energiju iz PV sistema, pod uslovom da je PV sistem dovoljno veliki da proizvede svu potrebnu energiju za EV, međutim, nije očekivano da se ovakav scenario dogodi u realnosti. Jasno je da na vrijednosti faktora K utiče dosta promjenljivih kao što su snaga PV u vremenu, raspodjela dolazaka vlasnika vozila kući, raspodjela pređene distance po danu, uticaj vikenda, praznika i godišnjih odmora itd., stoga je dobijanje tačne vrijednosti faktora K , zbog složenog matematičkog proračuna u pozadini, veoma komplikovano. Njegovo određivanje moglo bi se testirati Monte Carlo simulacijom uzimajući u obzir sve navedene promjenljive, međutim, takva simulacija izlazi iz okvira ovog rada i može biti tema nekog od budućih radova. Za potrebe ovog rada izvršen je proračun za nekoliko različitih vrijednosti faktora K i uočen je njegov uticaj na vrijeme otplate PV sistema.

D. Metod za proračun

Prvi dio rada razmatra slučaj ugradnje PV sistema i prelazak kupca električne energije u status kupac-proizvođač. Ukupna energija koju PV sistem proizvede u toku godine $E_{PV, g}$ računa se prema (1), dok se ukupna godišnja potrošnja domaćinstva $E_{p, D, g}$ računa prema (2)

$$E_{PV, g} = \sum_{h=1}^{8760} E_{PV} (h) \quad (1)$$

$$E_{p, D, g} = \sum_{h=1}^{8760} E_{p, D} (h) \quad (2)$$

gdje je sa h obilježen čas u godini. Energija iz PV sistema se koristi za pokrivanje potrošnje domaćinstva, ukoliko postoji višak proizvedene energije ona se šalje u mrežu po cijeni $c_{PV, M}$, a kada PV sistem ne proizvodi dovoljno energije za domaćinstvo, nedostatak se pokriva iz mreže po cijeni $c_{p, M}$. Razlika E_{Δ} između proizvedene energije i energije koja se potroši u domaćinstvu u toku godine dobija se iz izraza (3):

$$E_{\Delta} (h) = E_{PV, g} (h) - E_{p, D, g} (h) \quad (3)$$

Višak energije iz PV sistema $E_{PV, M, g}$, koji se na nivou godine proda u mrežu dobija se iz (4):

$$E_{PV, M, g} = \sum_{h=1}^{8760} E_{\Delta} (h) \quad \text{za} \quad E_{\Delta} (h) > 0 \quad (4)$$

Energija $E_{PV, D, g}$ koju PV sistem isporuči domaćinstvu u toku godine dobija se kao razlika ukupne energije koju PV proizvede u toku godine i energije koja se iz PV isporuči u mrežu i data je sa (5):

$$E_{PV, D, g} = E_{PV, g} - E_{PV, M, g} \quad (5)$$

Slijedi da se energija $E_{M, D, g}$ koju domaćinstvo, nakon ugradnje PV sistema, za pokrivanje potrošnje preuzme iz mreže na nivou godine dobija iz (6):

$$E_{M, D, g} = E_{D, g} - E_{PV, D, g} \quad (6)$$

Na osnovu ranije navedenih izraza, moguće je izračunati period otplate PV sistema, PO :

$$PO = \frac{c_i}{c_{p,D,g} - c_{M,D,g} + c_{PV,M,g} - c_{O\&M}} \quad (7)$$

gdje je $c_i = 10300 \text{ €}$ ukupna investicija u izgradnju PV sistema, $c_{O\&M}$ troškovi održavanja PV sistema koji godišnje iznose 2% od ukupne investicije, $c_{p,D,g}$ godišnji trošak energije koju domaćinstvo preuzme iz mreže bez instaliranog PV sistema, $c_{M,D,g}$ godišnji trošak energije koju domaćinstvo preuzme iz mreže sa instaliranim PV sistemom i $c_{PV,M,g}$ dobit ostvarena prodajom u mrežu viška energije iz PV sistema.

U drugom dijelu rada razmatra se uticaj kupovine EV na PO . Što se tiče punjenja EV, s obzirom na to da je ono u pokretu svaki dan i prelazi 75 km, pretpostavlja se da se EV svaki dan dopunjava do maksimalne napunjenosti. Ovo je opravdana pretpostavka, jer je cilj da baterija EV bude puna svaki dan prije vožnje, kako bi se, u slučaju nepredviđene vožnje duže od 75 km, izbjeglo punjenje EV na javnim punjačima, jer je cijena kilovat-časa energije iz javnih punjača viša od cijene koju plaća domaćinstvo za električnu energiju, a pogotovo na brzim DC punjačima, gdje cijena kilovat-časa može biti značajno veća [11]. S druge strane, klasični kućni punjač (engl. *wallbox*) ima snagu od 7 kW [12] i dovoljno je nekoliko sati da se baterija dopuni sa 20% do 100%. Energija $E_{EV,d}$ koju EV potroši u toku dana, tj. za pokrivanje distance od 75 km, iznosi 10,83 kWh.

Za razliku od prve situacije, kada smo imali proizvodnju PV sistema i potrošnju domaćinstva, čija razlika pokazuje kako se proizvedena energija raspoređuje između domaćinstva i mreže, sada imamo i električno vozilo, sa ciljem da se što više energije za punjenje EV preuzme iz PV sistema i tako poveća udio proizvedene energije u sopstvenoj potrošnji domaćinstva. Proizvodnjom iz PV sistema se sada zajedno pokrivaju potrošnja domaćinstva i punjenje EV, s tim da količina energije koja se uspije preuzeti iz sistema zavisi, između ostalog i od toga koliko vremena je EV parkirano kod kuće u doba dana kada PV sistem proizvodi energiju, tj. zavisi od faktora K . Ukoliko energija iz PV sistema nije dovoljna da u potpunosti pokrije zajedničku potrošnju, nedostatak energije preuzima se iz mreže po cijeni $c_{p,M}$, a u slučaju kada PV sistem pokriva kompletnu potrebu za energijom, višak proizvedene energije šalje se u mrežu po cijeni $c_{PV,M}$. Koliko će se energije iz PV sistema stvarno preuzeti za punjenje EV, zavisi od ranije pomenutog faktora K , tj. od toga koliko će vremena EV biti kući u toku proizvodnje PV sistema, kao i od toga za kakvu se raspodjelu energije između domaćinstva i EV odluči vlasnik, pa faktor K zapravo računamo na sljedeći način:

$$K = \frac{E_{PV,EV,g}}{E_{p,EV,g}} \quad (8)$$

Energija $E_{M,EV,g}$ koju EV preuzme iz mreže u toku godine računa se kao:

$$E_{M,EV,g} = (1 - K)E_{p,EV,g} \quad (9)$$

Višak energije $E_{PV,M,g}$ koji se iz PV sistema isporuči u mrežu dobija se iz:

$$E_{PV,M,g} = E_{PV,g} - KE_{p,EV,g} - E_{PV,D,g} \quad (10)$$

Na kraju, moguće je izračunati period otplate PV sistema u slučaju kupovine EV:

$$PO = \frac{c_i}{c_{p,D,g} + c_{DG} - c_{M,D,g} - c_{M,EV,g} + c_{PV,M,g} - c_{O\&M}} \quad (11)$$

gdje je c_{DG} godišnji trošak goriva koje potroši dizel vozilo ekvivalentno EV, pri istoj pređenoj distanci i $c_{M,EV,g}$ je trošak energije preuzet iz mreže za punjenje EV. Sve ostale promjenljive iz izraza (12) su već definisane i javljaju se u izrazu (7), u slučaju bez EV.

IV. REZULTATI

U Tabeli II prikazani su rezultati analize uticaja ugradnje PV sistema snage 6 kW, tj. efekti promjene stanja kupca u kupac-proizvođač. Izračunat je i period otplate PV sistema koji zavisi od količine energije koju PV sistem isporuči direktno u domaćinstvo, odnosno u mrežu.

TABELA II. REZULTATI ANALIZE NAKON UGRADNJE PV SISTEMA

Energija	[kWh]	Iznos	[€]
$E_{PV,D,g}$	1938,64	$c_{PV,D,g}$	911,16
$E_{PV,M,g}$	3918,06	$c_{PV,M,g}$	336,95
$E_{M,D,g}$	3076,19	$c_{M,D,g}$	1445,81
$E_{p,D,g}$	5016,00	$c_{p,D,g}$	2357,52

Na osnovu vrijednosti prikazanih u Tabeli II iz izraza (7) slijedi da je period otplate analiziranog sistema $PO = 9,88$ godina. Dakle, sa trenutnom cijenom električne energije $c_{p,M}$ u Njemačkoj, trenutnom garantovanom otkupnom cijenom $c_{PV,M}$ za kilovat-čas proizveden u PV sistemu i ukupnom godišnjom potrošnjom domaćinstva $E_{p,D,g}$, ovakav PV sistem se otplati za nepunih 10 godina.

Nakon što je određeno poslije kojeg perioda se otplati PV sistem, sljedeći korak je određivanje uticaja kupovine EV, kapaciteta baterije od 39 kWh, umjesto dizel vozila, na period otplate PV sistema. Kako je tačan udio energije proizvedene u PV sistemu u punjenju EV (faktor K) komplikovano odrediti, analiza je izvršena za više različitih vrijednosti faktora K , kako bi se grafički mogla prikazati zavisnost perioda otplate PV sistema od navedenog faktora, dok su u Tabeli III prezentovani rezultati opisane analize za četiri različite vrijednosti faktora K .

Situacija za $K = 0,63$ predstavlja specijalan slučaj u kojem EV preuzme svu moguću energiju iz PV sistema, ali tek nakon što se pokriju potrebe domaćinstva. To znači da PV sistem, nakon što zadovolji potrošnju domaćinstva, u najboljem slučaju može da pokrije 63% energije koja je godišnje potrebna za punjenje EV. Ako bi se punjenje EV postavilo kao prioritet u odnosu na potrošnju domaćinstva i ta energija preusmjerila ka EV, faktor K bi imao vrijednost veću od 0,63, ali sigurno manju od 1, jer postoje dani u godini kada

produkcija PV sistema nije dovoljna da pokrije dnevne potrebe EV za energijom, pa će u tom slučaju EV svakako morati dio potrebne energije da preuzme iz mreže.

TABELA III. REZULTATI ANALIZE NAKON KUPOVINE EV

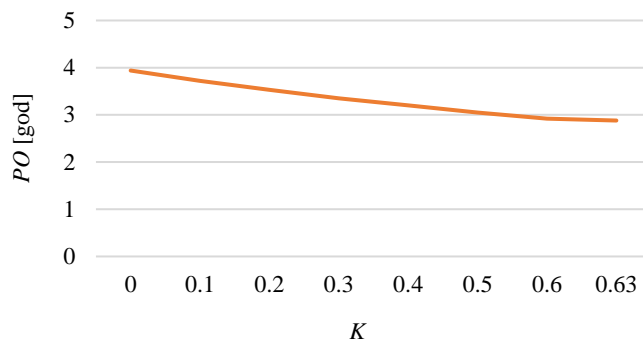
Energija [kWh]	$K = 0,63$	$K = 0,5$	$K = 0,1$	$K = 0$
$E_{PV,EV,g}$	2489,26	1976,47	395,12	0,00
$E_{PV,M,g}$	1428,80	1941,59	3522,94	3918,06
$E_{PV,D,g}$	1938,64	1938,64	1938,64	1938,64
$E_{M,D,g}$	3076,46	3076,46	3076,46	3076,46
$E_{M,EV,g}$	1463,69	1976,48	3557,83	3952,95
$E_{p,D,g}$	5016,00	5016,00	5016,00	5016,00
Iznos [€]	$K = 0,63$	$K = 0,5$	$K = 0,1$	$K = 0$
$c_{PV,EV,g}$	1169,95	928,94	185,79	0,00
$c_{PV,M,g}$	122,88	166,98	302,96	336,95
$c_{PV,D,g}$	911,16	911,16	911,16	911,16
$c_{M,D,g}$	1445,94	1445,94	1445,94	1445,94
$c_{M,EV,g}$	687,94	928,94	1672,10	1857,89
$c_{p,D,g}$	2357,52	2357,52	2357,52	2357,52
$c_{D,G}$	3430,09	3430,09	3430,09	3430,09
PO	2,88	3,05	3,72	3,94

Smanjenjem faktora K ispod 0,63, smanjuje se energija koju EV uzima iz PV sistema, pri čemu količina energije koju domaćinstvo preuzima iz PV sistema ostaje fiksna i maksimalna, a povećava se energija koju PV sistem šalje u mrežu po cijeni znatno nižoj od tržišne, što dovodi do produženja perioda otplate PV sistema. U Tabeli III prikazani su rezultati analize za vrijednosti faktora K od 0,5, 0,1 i 0. Kao što se vidi iz Tabele III, za sve vrijednosti $K \leq 0,63$, energija $E_{PV,D,g}$, koju domaćinstvo primi iz PV sistema je konstantna i iznosi 1938,64 kWh, što i jeste, prema (5), maksimalni iznos energije koju PV sistem može isporučiti domaćinstvu u toku godine, u skladu sa usvojenim modelima potrošnje i proizvodnje PV sistema. Zavisnost perioda otplate od faktora K prikazana je na Sl. 3. Kada je $K = 0$, što odgovara slučaju da se električno vozilo puni samo energijom iz elektroenergetske mreže, jer npr. vozilo nije kod kuće tokom dana, period otplate je najduži i iznosi 3,94 godine. Ako faktor K ima vrijednosti veće od nule, to znači da se za punjenje EV koristi dio energije i iz PV sistema. Samim tim manji dio energije se uzima iz elektroenergetske mreže i smanjuje se period otplate PV sistema. Ako bi se iskoristila maksimalno moguća energija iz PV sistema za punjenje električnog vozila tada bi se period otplate smanjio na 2,88 godina. Dakle, kako se udio energije iz PV sistema u punjenju EV kreće između 0% i 63% od ukupne energije potrebne za punjenje EV u toku godine, period otplate PV sistema se kreće u opsegu od 3,94 do 2,88 godina.

S obzirom na to da period otplate PV sistema u slučaju bez EV traje 9,88 godina, vidi se da na skraćivanje perioda otplate PV sistema najviše utiče kupovina električnog vozila umjesto dizel vozila. Kako je i prikazano u rezultatima, godišnji

troškovi goriva za dizel vozilo iste snage i skoro iste cijene, za istu pređenu godišnju distancu, iznose $c_{DG} = 3430,09$ €, dok godišnji troškovi električne energije za punjenje električnog vozila u najnepovoljnijem slučaju iznose $c_{p,EV,g} = 1858,46$ €, tako da se u toku godine po tom osnovu ostvaruje ušteda od:

$$c_{\Delta,gor} = c_{DG} - c_{p,EV,g} = 1571,63 \text{ €}$$



Sl.3. Zavisnost perioda otplate PV sistema od faktora K

V. ZAKLJUČAK

U radu su razmatrani ekonomski efekti ugradnje PV sistema snage 6 kW na krov kuće koja se nalazi u okolini Štutgarta u Njemačkoj. Pokazano je za koliko vremena se otplati takav sistem, uzimajući u obzir trenutnu cijenu električne energije iz distributivne mreže u Njemačkoj, kao i zagarantovanu cijenu električne energije koja se iz PV sistema prodaje u mrežu, a prema aktuelnoj verziji Zakona o obnovljivim izvorima energije Njemačke. Za analizu je izabrano domaćinstvo koje ostvaruje prosječnu godišnju potrošnju električne energije jedne četveročlane porodice. Rezultati pokazuju da je investicija u PV sistem opravdana, jer je period otplate analiziranog sistema nepunih 10 godina, pri čemu se podrazumijeva da je životni vijek fotonaponskih sistema, sa redovnim održavanjem, najmanje 20 godina, što je upravo i period važenja garantovane otkupne cijene i prava prvenstva predaje energije proizvedene PV sistemom u distributivnu mrežu.

Dotadna analiza je pokazala i kakav se efekat ostvaruje ukoliko se domaćinstvo odluči da, paralelno sa ugradnjom PV sistema, kupi novo električno vozilo, umjesto novog dizel vozila. Pokazuje se da se pod ovim okolnostima postiže period otplate analiziranog sistema između 2,88 i 3,94 godine, što zavisi od raspoloživosti EV u periodu kada PV sistem proizvodi energiju. Bitna napomena je da u analizi nije uzet u obzir period otplate EV, jer se podrazumijeva da vlasnik nije zamijenio postojeće dizel vozilo električnim, nego je pri odabiru novog vozila odlučio da to bude EV, a ne dizel vozilo, kao što je to bio slučaj ranije, pri čemu su cijene oba vozila približne. Dakle, i u najnepovoljnijem slučaju, period otplate PV sistema je 3,94 godine, što nam govori da električno vozilo ima dominantan uticaj na skraćivanje perioda otplate PV sistema, u odnosu na proizvedenu energiju.

LITERATURA

- [1] Campos I., Pontes Luz G., Marin-Gonzalez E., Gähns S., Hall S., Holstenkamp L. Regulatory challenges and opportunities for collective renewable energy Prosumers in the EU. Energy Policy, ISSN 0301-4215, 2019.
- [2] Carlos Canelada Martinez, Prosumers role in a changing electricity system: the non-individual prosumer perspective. Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden 2022.
- [3] Strom Report, *News strompreisentwicklung: so stark steigen die strompreise 2022*, 2022, Strompreise 2022 - News & Charts zur Strompreisentwicklung (strom-report.de)
- [4] PV Magazine, *Germany raises feed-in tariffs for solar up to 750 kW* Marian Willuhn, 2022, Germany raises feed-in tariffs for solar up to 750 kW – pv magazine International (pv-magazine.com)
- [5] EnBW, *Rechnungserläuterung*, Erläuterung zu Ihrer Rechnung | EnBW
- [6] Fereidoon Sioshanasi, *Consumer, prosumer, prosumer: How service innovations will disrupt the utility business model*, London, Velika Britanija, 2019.
- [7] AutoBild, Christian Jess, *Sprit wieder leicht teurer – diese Regionen sind am besten dran*, 2023, Sprit wieder leicht teurer – diese Regionen sind am besten dran - AUTO BILD
- [8] HOMER software, HOMER Pro - Microgrid Software for Designing Optimized Hybrid Microgrids (homerenergy.com).
- [9] NREL, kalkulator solarnog zračenja, <http://pvwatts.nrel.gov/>
- [10] Europe Nissan CDN, *PreiFste (MY2022)*, 2022, leaf-preisliste.pdf (nissan-cdn.net)
- [11] Solar Energie, *Elektroauto unterwegs laden*, Ullrich Bemann, 2021, Elektroauto unterwegs laden (solarenergie.de)
- [12] We power your car, 7kW VS 22kW - Which is better? - We Power Your Car

ABSTRACT

The paper examines the cost-effectiveness of installing a photovoltaic (PV) system in a household, whereby the consumer becomes prosumer. The German case is observed, which is characteristic due to the large price ratio of purchased and sold electricity. The first part of the paper is devoted to the cost-effectiveness of installing a PV system solely, while the second part analyzes the additional improvements resulting from the purchase of an electric vehicle (EV). The numerical example shows that the installation of a PV system in Germany, under current market conditions, pays off in 9.88 years. Switching to EV use under such conditions significantly shortens the payback period of the PV system, which ranges between 2,88 and 3,94 years, depending on how much electricity from the PV system can be used to charge the EV. It is shown that the replacement of diesel vehicle with EV has a greater effect on the payback period of the PV system than production from the PV system.

COST-EFFECTIVENESS ANALYSIS OF THE INSTALLATION OF PHOTOVOLTAIC SYSTEMS BY PROSUMERS IN GERMANY
Miloš Janković, Čedomir Zeljković, Predrag Mršić