

DOI: [10.46793/CIGRE37.C5.05](https://doi.org/10.46793/CIGRE37.C5.05)**C5.05****OPTIMALNA CENA ZA UČEŠĆE NA AUKCIJI ZA DODELJIVANJE TRŽIŠNE PREMIJE
KORIŠĆENJEM TEORIJE IGARA****OPTIMAL PRICE FOR PARTICIPATION IN AN AUCTION FOR AWARDING A
MARKET PREMIUM USING GAME THEORY****Aleksandar Janjić***

Kratak sadržaj: Tržišna premija je podsticaj za proizvodnju električne energije kojom država štiti proizvođača od promene tržišnih cena u odnosu na cenu koju proizvođač ponudi na aukciji tako što isplaćuje razliku između ponuđene cene na aukciji i tržišne cene. Ako tržišne cene budu veće od ponuđene cene proizvođača na aukciji, proizvođač će razliku platiti državi. Referentna tržišna cena za obračun tržišne premije je cena električne energije na srpskoj berzi (SEEPEx). Na aukcijama se proizvođači struje iz obnovljivih izvora takmiče u tome ko će ponuditi najnižu cenu po kojoj će prodavati struju, a pobednici aukcija dobiće državni podsticaj u vidu tržišne premije. U ovom radu, korišćena je teorija nekooperativnih igara radi određivanja optimalne cene koju proizvođač treba da ponudi na aukciji. Optimalna cena određena je u smislu Nešove ravnotežne tačke u prisustvu više igrača (ponuđača) sa različitim troškovima proizvodnje. Očekivana dobit modelovana je na bazi očekivanih berzanskih cena i očekivane satne proizvodnje elektrane za period važenja podsticaja. Metoda je ilustrovana na primeru prvog ciklusa aukcija u Republici Srbiji za dodelu kapaciteta i tržišnih premija za vetroelektrane. Metoda se pokazala veoma uspešnom u određivanju cene, kojom bi učesnici prvog ciklusa ostvarili mnogo veću dobit.

Ključne reči: aukcija, teorija igara, vetroelektrane, tržišna premija

Abstract: A market premium is an incentive for the production of electricity by which the state protects the producer from changes in market prices in relation to the price offered by the producer at auction by paying the difference between the bid price at the auction and the market price. If the market prices are higher than the producer's bid price at the auction, the producer will pay the difference to the state. The reference market price for the calculation of the market premium is the price of electricity on the Serbian Power Exchange (SEEPEx). At auctions, producers of electricity from renewable sources compete to see who will offer the lowest price at which to sell electricity, and the winners of the auctions will receive a state incentive in the form of a market premium. In this paper, the non-cooperative game theory is used to determine the optimal price that a producer should offer at an auction. The optimal price is determined in terms of the Nash equilibrium in the presence of multiple players (bidders) with different production costs. The expected profit is modelled based on expected power exchange prices

* dr Aleksandar Janjić, GOPA Intec, aleksandar.janjić@gopa-intec.de

and the expected hourly production of the power plant for the period of validity of the incentive. The method is illustrated on the example of the first cycle of auctions in the Republic of Serbia for the allocation of capacities and market premiums to wind turbines. The method has proven to be very successful in determining the price, which would make the participants of the first cycle much more profitable.

Key words: *auction, game theory, wind power plant, market premium*

1 UVOD

Teorija igara, matematički okvir za analizu strateških interakcija između racionalnih agenata, ima široku primenu u različitim oblastima, a poslednjih godina njena primena na tržištima električne energije privukla je značajnu pažnju. Teorija igara je ključna u planiranju konkurentnih tržišta električne energije. Pomaže regulatorima i planerima tržišta da shvate strateško ponašanje učesnika na tržištu i predvide ishode različitih tržišnih struktura. Jedan od ključnih modela koji se koriste je Kurnoov (Cournot) model konkurencije, gde se firme takmiče u količini proizvedene električne energije. Ovaj model pomaže u analizi tržišne moći od strane dominantnih igrača i njenog uticaja na tržišne cene i društvenu dobit [1].

Tržišta električne energije karakteriše potreba za balansiranjem ponude i potražnje u realnom vremenu. Teorija igara pruža alate za modelovanje i analizu strategija nadmetanja na tržištima dan unapred i u realnom vremenu. Koncept Nešove (Nash) ravnotežne tačke, gde nijedan igrač ne može imati koristi od jednostranog menjanja svoje strategije, često se koristi za predviđanje ponašanja učesnika na tržištu. Na primer, u jedinstvenoj aukciji cena, generatori nude svoje troškove proizvodnje, a market-kliring cena je određena presekom krive ponude i potražnje. Teorija igara pomaže u razumevanju kako da generatori strateški licitiraju kako bi maksimizovali svoj profit uz obezbeđivanje stabilnosti mreže [2].

Ulaganje u proizvodne kapacitete i infrastrukturu je ključno za dugoročnu stabilnost tržišta električne energije. Modeli teorije igara, kao što je Štakelbergov (Stackelberg) model konkurencije, gde jedna firma (lider) kreće prvi, a druge firme reaguju, koriste se za proučavanje investicionih odluka. Ovi modeli pomažu u razumevanju strateških interakcija između postojećih firmi i novih učesnika, uticaja regulatornih politika, mogućnost stvaranja kartela i ili odvrćanje od ulaska na tržište. Analizirajući ove interakcije, kreatori politike mogu dizajnirati podsticaje i propise koji promovišu efikasno ulaganje i konkurenciju [3].

Sve veći prodor obnovljivih izvora energije, kao što su vetar i sunce, usložnjava tržišta električne energije zbog njihove neizvesne prirode. Teorija igara se koristi za analizu strateškog ponašanja proizvođača obnovljive energije i njihovog uticaja na dinamiku tržišta. Na primer, kooperativni modeli teorije igara mogu da se koriste za strategiju proizvođača obnovljive energije pri formiranju koalicija za deljenje resursa i ublažavanje rizika, što dovodi do stabilnijih i efikasnijih tržišnih ishoda [4].

U ovom radu, teorija igara iskorišćena je za određivanje ponuđene cene na aukcijama za obnovljive izvore, što predstavlja slučaj nekooperativne igre više učesnika. Optimalna cena određena je u smislu Nešove ravnotežne tačke. Nakon kratkog objašnjenja aukcije, u posebnom poglavlju prikazan je i način određivanja ove tačke na primeru dva, a zatim i više učesnika u aukciji. U primeru su iskorišćeni realni podaci sa prve aukcije održane u Srbiji, 2023. godine.

2 TRŽIŠNA PREMIJA

2.1. Pojam tržišne premije

Tržišna premija je podsticaj za proizvodnju električne energije kojom država štiti proizvođača od promene tržišnih cena u odnosu na cenu koju proizvođač ponudi na aukciji tako što isplaćuje razliku između ponuđene cene na aukciji i tržišne cene. Ako tržišne cene budu veće od ponuđene cene proizvođača na aukciji, proizvođač će razliku platiti državi. Referentna tržišna cena za obračun tržišne premije je cena električne energije na srpskoj berzi (SEPEX).

U Srbiji su sprovedene već dve aukcije, pri čemu je Odlukom o maksimalno ponuđenoj ceni za električnu energiju za potrebe aukcija u sistemu tržišne premije utvrđena maksimalna ponuđena cena za vetroelektrane u iznosu 79 € po MWh, a za solarne elektrane u iznosu od 72 € po MWh (što je manje od prethodnih maksimalno ponuđenih cena od 105 € po MWh za vetroelektrane, odnosno 90 € po MWh za solarne elektrane).

Uredbom o kvoti u sistemu tržišne premije za vetroelektrane u drugom krugu aukcija iz 2025. godine, predviđeno je da kvota za vetroelektrane odobrene snage 3 MW i više iznosi 300 MW, dok je Uredbom o kvoti za solarne elektrane definisana kvota od 124,8 MW za solarne elektrane odobrene snage 500 kW i više (na planiranu kvotu od 100 MW dodat je kapacitet od 24,8 MW koji nije raspodeljen tokom prvih aukcija).

Prema Uredbi o tržišnoj premiji i Fid-in tarifi [5], tržišna premija obračunava se za isporučenu električnu energiju u obračunskom intervalu unutar obračunskog perioda, a u skladu sa sledećom formulom:

$$TP = OC - RC \quad (1)$$

gde TP označava tržišnu premiju, OC označava ostvarenu cenu, RC označava referentnu tržišnu cenu, sve izraženo u EUR po kWh. Ukoliko je RC viša ili jednaka OC , TP će biti jednaka nuli za taj obračunski interval. TP će biti jednaka nuli ukoliko je RC negativna.

Negativna premija obračunava se za isporučenu električnu energiju u obračunskom intervalu unutar obračunskog perioda, a u skladu sa sledećom formulom:

$$NP = RC - OC \quad (2)$$

gde NP označava negativnu premiju, izraženu u EUR po kWh;

Ako je RC manja ili jednaka OC , NP će biti jednaka nuli za taj obračunski interval.

2.1 Postupak aukcije

Sam aukcijski proces se sprovodi elektronskim putem u 4 faze: prijavljivanje; kvalifikacija; nadmetanje; i završna faza. Tokom faze prijavljivanja, učesnici podnose, menjaju ili povlače prijavu za učestvovanje na aukciji; dostavljaju finansijsku ponudu, ponuđeni kapacitet za snabdevanje krajnjih kupaca u Republici Srbiji i sva dokumenta propisana javnim pozivom; Takođe, zainteresovani učesnici su dužni da u toku faze prijavljivanja dostave finansijski instrument obezbeđenja.

U završnoj fazi, Ministarstvo donosi pojedinačna rešenja o dodeljivanju ili odbijanju prava na tržišnu premiju svakom od učesnika. Učesnici potom zaključuju ugovor o tržišnoj premiji sa

ovlašćenom ugovornom stranom i dostavljaju finansijsko sredstvo obezbeđenja. Očekivani rok za realizaciju projekata iznosi najviše 4 godine od dana sticanja statusa privremeno povlašćenog proizvođača, za projekte za koje je pribavljena građevinska dozvola pre sticanja statusa, odnosno najviše 6 godina za projekte za koje nije pribavljena građevinska dozvola.

U odnosu na prethodni ciklus, novom Uredbom o tržišnoj premiji i fid-in tarifi prošireni su i precizirani elementi javnog poziva kao i uslovi za prijavljivanje na aukciju, poboljšani postupak dostavljanja dokumentacije – dokaza koji učesnici na aukciji prilažu uz prijavu, te bliže definisani kvalifikacioni uslovi za aukciju. Najznačajnije novine Uredbe tiču se odredaba kojima se bliže uređuje sprovođenje postupka aukcija uz primenu dodatnog kriterijuma koji je, kao mogućnost, uveden još prošlogodišnjim izmenama Zakona o korišćenju obnovljivih izvora energije. Dodatni kriterijum sastoji se u obavezi učesnika aukcije da sa garantovanim snabdevačem i/ili krajnjim kupcem zaključi ugovor o otkupu električne energije za određeni procenat kapaciteta elektrane. To znači da u slučaju da se aukcija sprovodi uz primenu navedenog kriterijuma, prilikom rangiranja ponuda učesnika aukcije i popunjavanja kvote, pored ponuđene cene, uzima se u obzir i procenat kapaciteta elektrane učesnika aukcije koji je ponuđen garantovano snabdevaču (EPS) za potrebe garantovanog snabdevanja ili krajnjim kupcima u Srbiji kroz ugovor o otkupu električne energije iz obnovljivih izvora (kroz tzv. korporativni PPA).

Ovaj ugovor između ostalih, sadrži sledeće elemente:

1. obavezu isporuke električne energije iz elektrane učesnika aukcije u odnosu na koju je podneta finansijska ponuda garantovano snabdevaču ili krajnjem kupcu u Srbiji;
2. rok trajanja ugovora o otkupu električne energije iz obnovljivih izvora
3. procenat kapaciteta elektrane učesnika aukcije izražen u snazi (MW) elektrane koji je ponuđen garantovano snabdevaču, odnosno krajnjem kupcu tokom roka trajanja ugovora o otkupu električne energije iz obnovljivih izvora;

Ukupna vrednost bodova koje ostvaruje ponuđač definisana je formulom (3):

$$UB = \pi \frac{\text{najniža cena}}{\text{ponuđena cena}} + (100 - \pi) \frac{\text{kriterijum kapaciteta}_1}{\text{kriterijum kapaciteta}_{max}} \quad (3)$$

Gde je π faktor ponderisanja kriterijuma cene i kriterijuma kapaciteta.

Obračun vrednosti kriterijuma kapaciteta vrši se primenom formule (4) koja je propisana pomenutom Uredbom.

$$KK = \frac{\sum_{g=1}^{15} \min(0,3 \cdot KE \sum_{u=1}^{Mg} KUO_{gu})}{KE \cdot 15} \quad (4)$$

Gde je KK kriterijum kapaciteta, KE kapacitet elektrane, a KUO kapacitet iz ugovora o otkupu.

Na osnovu ponuđenih cena, raspodeljuju se i kvote i određuju tržišne premije za svakog ponuđača. Što je niža ponuđena cena, ponuđač ima veće šanse da dobije veću kvotu. Time bi smanjio rizik na tržištu, ali smanjio i svoj očekivani prihod. Sa druge strane, što je veća ponuđena cena, povećava se i rizik da ponuđač ne dobije premiju za ceo ponuđeni kapacitet, ili čak ne uopšte ne dobije premiju. To naravno ne znači da neće ostvariti nikakav profit. Štaviše, sa trenutnim cenama na tržištu proizvođač možda ostvari i veći profit, ali je dugoročno izložen mnogo većem riziku.

Ovakva situacija kada odluka učesnika u aukciji o ponuđenoj ceni zavisi i od očekivane reakcije ostalih učesnika u procesu, u potpunosti odgovara slučaju više učesnika u nekooperativnoj igri, sa različitim vrednostima dobiti za svakog učesnika. Modelovanje ovog slučaja biće prikazano u narednom poglavlju.

3 TEORIJA IGARA U ODREĐIVANJU PONUĐENE CENE

Nešov ekvilibrijum je kombinacija akcija (odluka) $a^* = (a_1^*, a_2^* \dots, a_n^*)$, gde svakom učesniku igre i , $i = 1, 2, \dots, n$ odgovara konkretna akcija a_i^* , koja ima osobinu da birajući bilo koju akciju drukčiju od a_1^* (pri čemu ostalih $n - 1$ učesnika ne menjaju svoje odluke), učesnik i ne može postići po sebe bolji rezultat od onog koji je predstavljen upravo akcijom a_i^* .

Čista strategija je deterministička politika (igrač igra jednu strategiju sa verovatnoćom 100%, a ostale sa 0%) i daje kompletne podatke o igranju igre od strane igrača koji je primenjuje. Mešovita strategija je skup čistih strategija igrača u kome je svakoj čistoj strategiji dodeljena verovatnoća izbora te strategije. Suma verovatnoća izbora mora da iznosi 100%. Profil strategija je skup strategija koji čini po jedna izabrana strategija za svakog igrača. Za svaki profil može da se odredi ishod za svakog igrača. Rešenje igre je profil strategija koji čini po jedna izabrana strategija od strane svakog igrača.

Radi ilustracije, prikazaćemo slučaj 2 proizvođača koji konkurišu za kvotu od 150 MW. Svaki od ponuđača nudi kapacitet od 100 MW. U slučaju da je cena prvog proizvođača niža, on dobija ugovor sa ponuđenom cenom za ceo ponuđeni kapacitet. Drugi proizvođač dobija samo razliku do pune kvote, a to je 50 MW. U slučaju da ponude istu cenu, proizvođači srazmerno dele kvotu (svako po 75 MW).

U tabeli 1 prikazana je raspodela dobiti za nivo od 4 ponuđene cene. Vrednosti u zagradama (a , b) predstavljaju godišnji prihod svakog od proizvođača (a za proizvođača A i b za proizvođača B u milionima evra).

Vrednosti a i b iz tabele računati su na osnovu izraza (5).

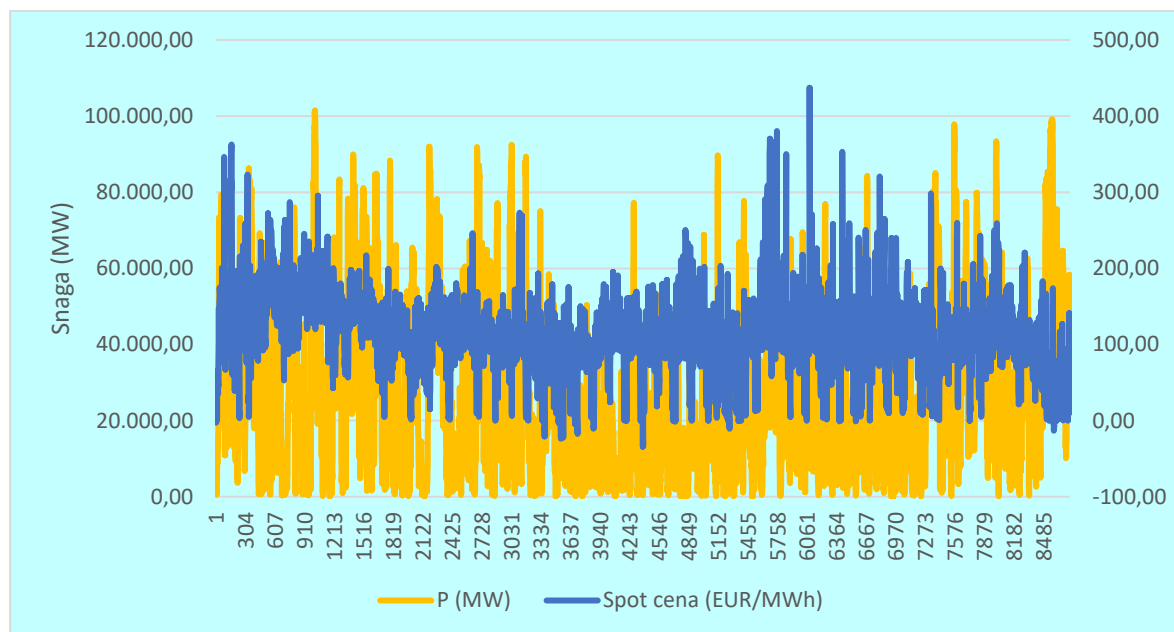
$$D = \sum_{i=1}^{8760} 0,85 \cdot c_i \cdot P_i \pm (TP_i, NP_i) \quad (5)$$

c_i označava cenu na spot tržištu u satu i , P_i je ostvarena energija u tom satu. Ukupna cena na tržištu uobičajeno je umanjena za troškove balansiranja, u ovom slučaju korišćen je faktor 0,85.

Tabela 1: Matrica dobiti

Ponuđene cene (€/MWh) Ponuđač br. 1 ► Ponuđač br. 2 ▼	50	55	60	65
50	(<u>5.8</u> , <u>5.8</u>)	(<u>7.8</u> , 4.4)	(7.8, 5.1)	(7.8, 5.6)
55	(4.4, <u>7.2</u>)	(6.6, 6.6)	(<u>8.9</u> , 5.2)	(8.9, 5.6)
60	(5.1, 7.8)	(5.1, <u>8.9</u>)	(7.6, 7.6)	(<u>10.1</u> , 5.1)
65	(5.1, 7.8)	(5.1, 8.9)	(5.1, <u>10.1</u>)	(8.4, 8.4)

Satne vrednosti spot cena za 2024 godinu na HUPEX-u, kao i podaci o proizvodnji jedne vetroelektrane u Srbiji snage 100 MW za tipičnu meteorološku godinu prikazane su na slici 1.



Slika 1: Satne vrednosti spot cena i proizvodnje vetroelektrane

Iz tabele 1, vidljivo je da postoji samo jedan Nešov ekvilibrijum (5,8, 5,8), što znači da je najbolja strategija za oba igrača da ponude najnižu cenu. Poznato je da Nešova ravnotežna tačka nije optimum u smislu Pareto kriterijuma optimizacije. Iz tabele 1 vidi se da je za oba učesnika bolje da ponude najvišu cenu, ali je smisao Nešove ravnotežne tačke upravo najbolji odgovor na očekivani potez protivnika.

4 ILUSTRATIVNI PRIMER - PRVI KRUG AUKCIJA U SRBIJI

U ovom primeru korišćeni su podaci sa prve aukcije održane 2023. godine i javno objavljeni rezultati od strane Ministarstva rudarstva i energetike [6]. Rezultati su prikazani u Tabeli 2. Od ukupnog broja prijavljenih investitora, u fazu nadmetanja kvalifikovalo se 11 učesnika. U postupku aukcija za vetroelektrane četiri investitora su popunila kvotu, a u postupku aukcija za solarne elektrane tri. Maksimalna ponuđena cena za električnu energiju za potrebe aukcija za vetroelektrane u sistemu tržišne premije iznosila je 105 po MWh, a najniža ponuđena cena 64,48 evra po megavat-satu (€/MWh) za vetroelektrane, odnosno 88,65 evra po megavat-satu za solarne elektrane. Odobrena kvota iznosila je 400 MW.

Tabela 2: Rang lista za vetroelektrane

Ponudač	Kapacitet elektrane (MW)	Ponuđena cena €/MWh	Ponuđeni kapacitet MW	Dodeljena kvota MW
A	291	64,48	210	210
B	95,5	68,88	68	68
C	150	73,7	108,5	108,5
D	150	79	105	13,5

Budući da je udeo kriterijuma kapaciteta iznosio samo 5%, u daljoj analizi korišćen je samo kriterijum najniže cene, kao dominantan. Metodologija je primenjena na slučaj aukcije za vetroelektrane. Radi lakšeg prikaza metodologije, pretpostavljeno je da su kompanije pred sobom imale 3 moguće akcije: ponuditi cenu od 60 €, 70 € ili 80 €/MWh. Vrednost ponuđenog kapaciteta nije razmatrana kao promenljiva veličina. Odobreni kapaciteti svakom od proizvođača u zavisnosti od kombinacije ponuđenih cena prikazane su u tabeli 3. Prikazane su samo neke od vrednosti, zbog veličine tabele.

Tabela 3: Kombinacije odobrenih kapaciteta

Odobreni kapacitet (MW) za pojedine proizvođače	A	B	C	D
Kombinacija cena (€/MWh)				
(60 60 60 60)	170	90	85	55
(60 60 60 70)	200	100	100	0
(60 60 60 80)	200	100	100	0
...				
(80 80 80 80)	170	90	85	55

U Tabeli 4 prikazani su rezultati optimizacije. Optimizacija je vršena putem nelinearnog modela optimizacije u prostoru dimenzije jednakom zbiru ukupnog broja čistih strategija u igri i broja igrača [7]. Vrednosti u tabeli prikazuju verovatnoće mešovite strategije. Očekivane dobiti su date u relativnim vrednostima koje su svedene na baznu vrednost od 100 MW.

Tabela 4: Granične verovatnoće za postizanje optimalne vrednosti ponuda

Proizvođač	A	B	C	D
Ponuđena cena				
60 €	0.32	0.74	0.9	1
70 €	0	0.26	0.1	0
80 €	0.68	0	0	0
Očekivana dobit (M€)	8.62	8.66	9.08	9.65

Vrednosti u tabeli prikazuju granične verovatnoće do kojih je ova kombinacija pojedinačnih odluka optimalna, u smislu Nešovog ekvilibrijuma. Konkretno, najbolje je da proizvođači A ponudi najvišu, a ostali proizvođači najnižu cenu. Kao što smo naglasili, ovo nije optimalno rešenje za sve učesnike u smislu Pareto optimuma ali jeste optimalno u pogledu odgovora na mogući potez drugih učesnika u aukciji.

5 ZAKLJUČAK

Teorija igara pruža dragocene uvide u strateško ponašanje učesnika na tržištu električne energije. Njegova primena u dizajnu tržišta, strategijama određivanja cena, investicionim odlukama i integraciji obnovljivih izvora energije pomaže u stvaranju efikasnih, konkurentnih i stabilnih tržišta električne energije. Kako sektor električne energije nastavlja da se razvija sa tehnološkim napretkom i promenama politike, teorija igara će ostati ključno sredstvo za razumevanje i optimizaciju dinamike tržišta

6 LITERATURA

- [1] Conejo, A. J., Baringo, L., Kazempour, S. J., & Siddiqui, A. S. (2010). Investment in Electricity Generation and Transmission: Decision Making Under Uncertainty. Springer.
- [2] Hobbs, B. F. (2001). Linear Complementarity Models of Nash-Cournot Competition in Bilateral and POOLCO Power Markets. IEEE Transactions on Power Systems, 16(2), 194-202.
- [3] Kirschen, D. S., & Strbac, G. (2004). Fundamentals of Power System Economics. Wiley.
- [4] Ventosa, M., Baíllo, Á., Ramos, A., & Rivier, M. (2005). Electricity market modeling trends. Energy Policy, 33(7), 897-913.
- [5] *Uredba o tržišnoj premiji i fid-in tarifi "Sl. glasnik RS", br. 90/2024*
- [6] <https://www.mre.gov.rs/vest/sr/1718/zavrsene-prve-aukcije-za-premije-za-zelene-megavate.php>
- [7] B. Chatterjee, "An optimization formulation to compute Nash equilibrium in finite games," 2009 Proceeding of International Conference on Methods and Models in Computer Science (ICM2CS), New Delhi, India, 2009, pp. 1-5,