

**KRATKOROČNA PROGNOZA POTROŠNJE U AKTIVNIM DISTRIBUTIVNIM MREŽAMA****SHORT-TERM LOAD FORECAST IN ACTIVE DISTRIBUTION NETWORKS**Slađana Turudić, *Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad***Oblast – ELEKTROTEHNIKA I RAČUNARSTVO**

**Kratak sadržaj** – *Distributivni sistem doživljava, pored potrošača, najveće promjene koje donosi modernizacija elektroenergetskog sistema. Ispravan rad i funkcionisanje moderne elektrodistributivne mreže, zahtijeva precizno predviđanje potrošnje električne energije. Kratkoročna predviđanja pomažu pri procjenama toka energije što uveliko može smanjiti broj preopterećenja, povećati skalabilnost isporuke i redukovati ispađe iz mreže.*

**Ključne reči:** *Prognoza potrošnje električne energije, mašinsko učenje, optimizacija, aktivna distributivna mreža*

**Abstract** – *In addition to consumers, the distribution system is experiencing the biggest changes brought by the modernization of the electric power system. For electrical distribution network to function properly, it is necessary to predict the electricity consumption as precisely as possible. Short-term predictions in energy flow can greatly reduce the number of overloads, increase delivery scalability and reduce grid outages.*

**Keywords:** *Electricity consumption forecast, machine learning, optimization, active distribution network*

**1. UVOD**

Povećana potrošnja električne energije i razvoj novih tehnologija predstavljaju glavne trendove, ali i izazove koji se nalaze pred nama. Sve veći zahtjevi za pouzdanošću i skalabilnošću zahtijevaju velika ulaganja u elektroenergetsku mrežu. Istovremeno, krajnja upotreba ali i sama proizvodnja električne energije prolaze kroz velike promjene koje su posljedica sve većeg upliva različitih tehnologija i drugih dostignuća u ovoj oblasti. Sve te promjene dovode do transformacije tradicionalnog elektroenergetskog sistema u jedan moderan sistem koji teži ka cilju snabdijevanja pouzdanom električnom energijom iz sve čistijih i jeftinijih izvora. Izuzetno je važno pronaći rješenja koja su prije svega održiva i ekonomski isplativa, a koja doprinose boljem i kvalitetnijem životu na raznim poljima.

U ovom radu, fokus je na modernim distributivnim mrežama kojima je neophodna softverska podrška za olakšavanje posla operaterima u svakodnevnom radu, a koja uz to povećava prihode i kvalitet isporuke,

**NAPOMENA:**

**Ovaj rad proistekao je iz master rada čiji mentor je bio dr Aleksandar Selakov, docent.**

smanjujući rashode. Za operatere distributivne mreže važno je da predvide kako će se potrošnja električne energije odvijati u budućnosti, jer to direktno utiče na planiranje mreže i poslovanje.

Noviteti kao što su obnovljivi izvori i električni automobili imaju različite vrste uticaja na opterećenje distributivne mreže. Distributivna mreža je prvobitno dizajnirana i izgrađena da zadovolji vršnu potrošnju i pasivno isporučuje energiju kroz radijalnu strukturu. Danas, mnogi korisnici sve više koriste distributivnu mrežu kao način za balansiranje vlastite proizvodnje i potrošnje. Ovakvi kontradiktorni interesi su dramatično promijenili rad distributivne mreže [1].

**2. AKTIVNA DISTRIBUTIVNA MREŽA**

Distributivna mreža je u većini slučajeva bila radijalna. Prilikom njene izgradnje nije bilo planirano priključenje distribuiranih izvora energije na nju. Tokovi snaga u distributivnim mrežama, bez distribuiranih izvora energije, su jednosmjerni, odnosno teku u jednom smjeru i to od mjesta preuzimanja energije pa do potrošača. Priključenjem nekog distribuiranog izvora energije, distributivna mreža gubi radijalnost, dolazi do promjene smjerova tokova snaga, a distributivni vodovi postaju dvostrano napajani što igra veliku ulogu u samom rukovanju pametnim elektroenergetskim mrežama. Distributivna mreža nije više pasivan, već postaje aktivan elemenat elektroenergetskog sistema.

Distribuirani izvori električne energije predstavljaju jedinice snage 10 MW ili manje, koje imaju mogućnost pružanja usluga elektroenergetskom sistemu (proizvodnja, skladištenje električne energije) i koje se mogu priključiti na gotovo bilo koju tačku sistema. Iako se obično vežu za obnovljive izvore, distribuirane proizvodne jedinice mogu biti i neobnovljive, tj. obuhvataju sljedeće tehnologije: elektrane na biomasu, solarne elektrane, vjetroelektrane, hidroelektrane, mikroturbine na prirodni gas, dizel elektrane i drugo [2]. Takođe, ove jedinice mogu biti povezane na mrežu ili raditi u izolovanom modu u odnosu na mrežu.

Aktivne distributivne mreže nude bolje rješenja za fleksibilno korištenje distribuiranih energetske resursa. Navedene tehnologije imaju potencijal da smanje uticaj fluktuacije cijene električne energije, povećaju sigurnost napajanja, smanje broj zagušenja, obezbijede veću pouzdanost i smanje emisiju gasova sa efektom staklene bašte kroz finansijski održiv i operativno efikasan sektor distribucije. Tome značajno doprinosi digitalna revolucija

u ekonomiji. Sve više su prihvaćene digitalne tehnologije, od implementacije hardverskih sredstava kao što su pametna brojila, digitalne podstanice i pametna infrastruktura za punjenje električnih vozila do korištenja softverskih rješenja kao što su vještačka inteligencija, digitalni blizanci i *blockchain* tehnologija kako bi se pomoglo distributivnim kompanijama da smanje gubitke u distribuciji i poboljšalo predviđanje potražnje kako bi omogućio bolje integrisanje obnovljive energije.

Međutim, brojni faktori, kao što je varijabilnost opterećenja, rast potražnje i tržišne cijene električne energije nameću operativne nesigurnosti u planiranju distributivnog sistema. Složeni efekat ovih nesigurnosti može dovesti do nekoliko operativnih i kontrolnih izazova. Tačno i efikasno modeliranje ovih nesigurnosti neophodno je da bi se osigurala optimalna integracija distribuiranih energetskih resursa u distributivni sistem [3, 4].

Ključni elementi, karakteristike i funkcionalni zahtjevi su:

- Aktivna mreža zahtijeva efikasnu i koherentnu vidljivost različitih uređaja povezanih na nju kako bi se omogućilo pravovremeno donošenje odluka i protok informacija.
- Potrebno je osigurati kompatibilnost svih funkcija i uređaja prilikom prelaska sa sadašnjih na buduće aktivne distributivne mreže.
- Centralizovana ručna kontrola treba da bude zamijenjena distribuiranom automatizovanom kontrolom koja će biti koordinisana i integrisana u postojeće metodologije upravljanja kako bi se iskoristila inteligencija koja će unaprijediti mreže budućnosti.
- Sposobnost različitih predviđanja je jedan od ključnih zahtjeva.
- Samoizlječenje.

### 2.1. Uticaj obnovljivih izvora na distributivnu mrežu

Sve je više razloga koji utiču na povećanje udjela obnovljivih distribuiranih izvora u proizvodnji električne energije, a neki od osnovnih su:

- Zaštita životne sredine, smanjenje emisije štetnih gasova i predupređenje rizika koje nosi nuklearna energetika.
- Poboljšanje energetske sigurnosti, smanjenje zavisnosti od uvoza energije i smanjenje posljedica postepenog nestajanja goriva fosilnog porijekla.
- Kako su snage distribuiranih izvora relativna male, u usporedbi s konvencionalnim generatorima, lakše je pronaći odgovarajuće mjesto za smještaj ovakvih postrojenja.
- Troškovi održavanja distribuiranih izvora su znatno niži od održavanja centralnih proizvodnih objekata.
- Proizvodnje jedinice su smještene u blizini potrošača čime se znatno smanjuju gubici jer se energija prenosi na manjim udaljenostima.

Instalirani kapaciteti obnovljivih izvora energije postaju sve veći tako da oni imaju sve značajniji uticaj, kako na distributivnu mrežu na koju su priključeni tako i na ostatak elektroenergetskog sistema, u smislu naponskih prili-

ka, tokova snaga, nivoa gubitaka, dejstva na ponašanje uređaja relejne zaštite i dr. Priključenje distributivnih izvora zahtijeva primjenu raznih regulacionih i mjernih uređaja i sistema energetske elektronike, radi održavanja vrijednosti određenih veličina u propisanim intervalima. Moraju se preduzeti dovoljne kontrolne radnje koje su u stanju da zadovolje povećanu potražnju za energijom, da ublaže probleme nesigurnosti i izbjegnju fluktuacije napona u distributivnim sistemima.

### 2.2. Uticaj električnih vozila na distributivnu mrežu

Imajući u vidu da u sektoru transporta emisija CO<sub>2</sub> bilježi veoma visok, zabrinjavajući i nedozvoljen rast, sve više se, u cilju smanjenja emisija štetnih gasova, u upotrebu uvode električna vozila, kao rješenje koje može da podrži ambiciozne ciljeve dekarbonizovane i održive budućnosti [5].

Predviđena penetracija električnih vozila prijeti da dovede do značajnog povećanja opterećenja u kompletnom elektroenergetskom sistemu, a naročito u distributivnom, kao direktnoj tački kontakta sa novim distribuiranim resursima. Ovo može da rezultira narušavanjem propisanog nivoa kvaliteta, sigurnosti i pouzdanosti sistema jer se radi o potrošačima velikih snaga kojima je cilj napuniti bateriju u što kraćem vremenu i nastaviti s putovanjem. Potrošnja je nepredvidiva u vidu količine energije i vremena trajanja što predstavlja novi izazov sa kojim se bore elektroenergetski sistemi.

Neophodna su različita istraživanja koja uključuju i socijalne i tehničke aspekte da bi mogli znati kako će tačno električni automobili uticati na distributivnu mrežu.

S obzirom da prodaja i korištenje električnih vozila neće biti geografski podjednako raspoređeno, mogu se posebno očekivati lokalni uticaji na distributivnu mrežu. Pored toga, mogu se očekivati problemi u pogledu kapaciteta transformatorskih stanica i niskonaponskih vodova u trenutku kada više od 40% korisnika koji se napaja iz jedne transformatorske stanice nabavi električno vozilo. Uticaj punjenja električnih vozila na distributivne mreže zavise od karakteristika pojedinačne mreže, broja električnih vozila na tom području te snaga i vremena punjenja. Stoga je za svaku distributivnu mrežu potrebno posebno vršiti analize uticaja punjenja na tu mrežu [6].

### 2.3. Uticaj električnih vozila i *behind-the-meter* DER-ova na STLF u distribuciji

Opterećenje električnih vozila je ugrađeno u prirodno opterećenje izmjereno u nekom području (npr. trafostanica). Ne možemo to eksplicitno isključiti i modelovati nezavisno, a samim tim ne možemo ni predvidjeti nezavisno.

Značajna količina distribuirane proizvodnje je „nevidljiva“ za operatore distributivnog sistema jer se nalazi iza brojila u prostorijama potrošača i nije direktno pod nadzorom preduzeća. DER-ovi (*Distributed Energy Resources*) dodaju nepoznatu promjenljivu potražnju u sistemu (pozitivnu i negativnu), što uzrokuje dodatnu nesigurnost u određivanju ukupnog opterećenja.

Sa STLF gledišta, možemo razlikovati dva pristupa. Prvi pristup je sličan ideji za električna vozila - DER tehnologije iza brojila ugrađene su u izvorno opterećenje.

One se mogu prognozirati zajedno sa opterećenjem, dok u drugom pristupu DER-ove treba samostalno modelirati i na taj način prognozirati. Granica između ova dva pristupa je nejasna, čest pristup je da se „niska“ penetracija DER-a može modelovati zajedno, dok „visoku“ treba analizirati nezavisno.

### 3. KRATKOROČNA PROGNOZA POTROŠNJE U DISTRIBUTIVNOJ MREŽI

Implementiran je model za kratkoročnu prognozu potrošnje električne energije koji integriše vještačku neuronsku mrežu i genetski algoritam, pri čemu je vještačka neuronska mreža korišćena za dobijanje preciznog modela, a genetski algoritam za optimizaciju ulaznih parametara i hiper parametara neuronske mreže.

#### 3.1. Optimizacija hiper parametara i ulaznih parametara u neuronsku mrežu

U ovom radu, genetski algoritam je zadužen za optimizaciju hiper parametara neuronske mreže. Optimalne vrijednosti ovih parametara se razlikuju za svaki pojedinačan slučaj implementacije neuronske mreže. Funkcija troška za genetski algoritam je MAPE koja se dobija obukom i predviđanjem ANN sa različitim vrednostima hiper parametara.

Odabrano rješenje je označeno kao ono sa najnižom MAPE. Međutim, rješenje se može izabrati, s obzirom na tačnost ili vrijeme izvršavanja. Izvršenje genetskog algoritma je završeno nakon 50 iteracija, a Tabela 1 prikazuje dobijeno rješenje.

Tabela 1. Optimizovane vrijednosti hiper parametara neuronske mreže

Hiper parametar	Optimizovana vrijednost
Broj epoha	95
Broj paketa	1
Broj skrivenih slojeva	2
Broj neurona u skrivenim slojevima	10
Optimizator	Adam
Aktivaciona funkcija	Sigmoid

Optimalan izbor ulaznih parametara u neuronsku mrežu može biti drugačiji u zavisnosti od različitih okolnosti kao što su geografska lokacija, infrastruktura električne mreže, socijalne karakteristike i sl. Takođe, izbor optimalnih parametara može varirati u zavisnosti od perioda godine tako da se ova optimizacija izvršava jednom mjesečno u implementiranom modelu.

#### 3.2. Ulazni podaci

U radu se koriste meteorološki podaci, na satnom nivou, i istorijski podaci potrošnje električne energije, mjereni na svakih 5 minuta, za Njujork i *North* (dio PJM berze - PJM je kompanija koja, između ostalog, vodi energetske tržište). Korišćeni su podaci u periodu od početka 2018. godine do oktobra 2021. godine.

#### 3.3. Analiza performansi modela

Korišćena mjera za preciznost modela je srednja apsolutna procentualna greška - MAPE. Veoma je intuitivna i pruža jasan uvid u kvalitet performansi modela. Obično se pomoću MAPE rezultat definiše u procentima, a izračunava se pomoću sledeće formule:

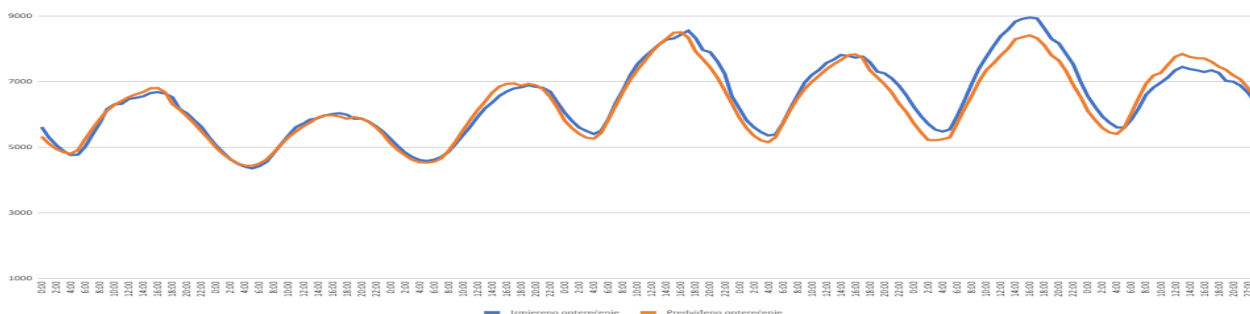
$$M = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{y_i - f_i}{y_i} \right| \times 100 \quad (1)$$

gdje je  $y_i$  označava izmerenu vrijednost, a  $f_i$  označava predviđenu vrijednost.

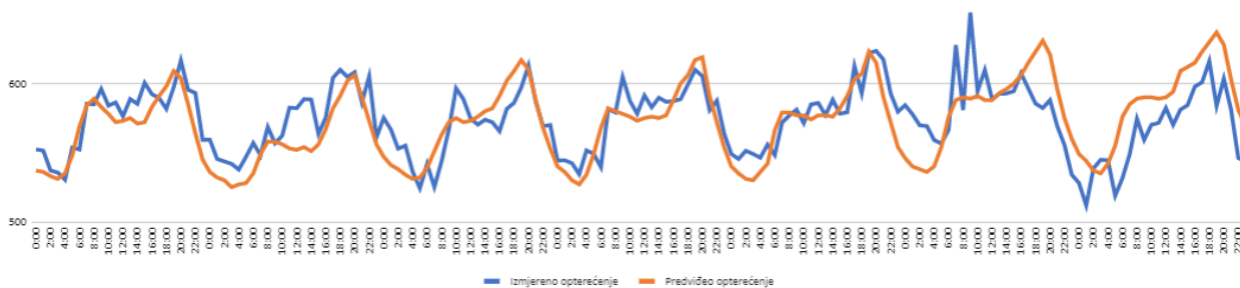
### 4. REZULTAT PRIMJENJENOG MODELA

Distributivni potrošači su mnogo volatilniji od prenosnih. U najširem smislu volatilnost je mjera slučajne promjene potrošnje električne energije. Što je stepen slučajnosti veći, to je veća volatilnost. Osnovni uzroci volatilnosti su operativni rizici (npr. kvarovi), rizik lošeg predviđanja potrošnje, proizvodni miks (kao rezultat različitih tehnologija koje učestvuju u procesu proizvodnje), vršna potrošnja, upravljanje zagušenjima, uvoz/izvoz, sve veća integracija “nevidljivih” proizvođača i slično. Na bazi analize volatilnosti predviđaju se i pokušavaju minimizirati rizici, modelovati ponašanje potrošača i predvidjeti potrošnja električne energije u budućnosti. Predviđanje volatilnosti potrošnje električne energije stoga je ključno pitanje za distribuciju, ali i za učesnike na tržištu u cilju ostvarivanja što većeg profita, smanjenja rizika i gubitaka, formiranja odgovarajuće ponude i potražnje, itd.

Implementirani model kratkoročnog predviđanja potrošnje električne energije primjenjujemo i na istorijske meteorološke podatke i podatke opterećenja za grad Njujork. Slika 2 prikazuje krive ostvarene i prognozirane potrošnje. MAPE iznosi 3.12 % za prognozirani period od sedam dana (koji nisu dio ulaznih podataka u model). Slika 3 prikazuje razliku između ostvarene i predviđene potrošnje električne energije za slučaj *North*-a. MAPE iznosi 2,81% za period koji je razmatran i u prethodnom primjeru.



Slika 1. Grafički prikaz prognozirane i ostvarene potrošnje za slučaj Njujorka

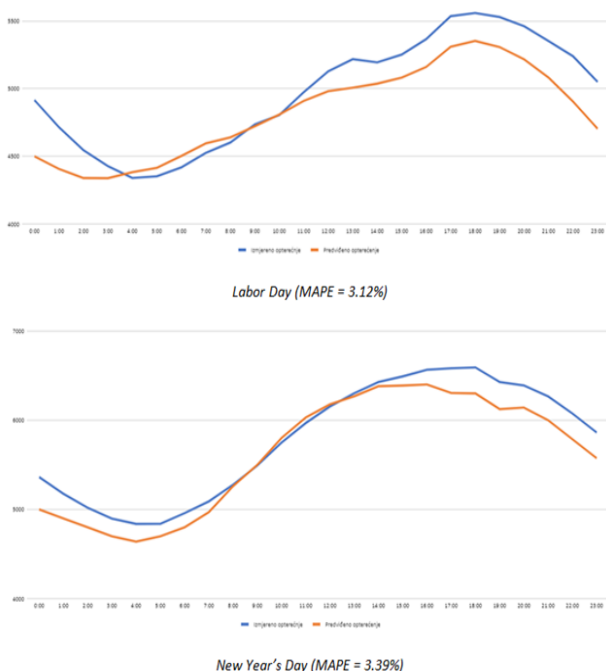


Slika 2. Grafički prikaz prognozirane i ostvarene potrošnje za slučaj North-a

U ovom radu razmatrana je i metoda izbora sličnih dana. Cilj filtera sličnih dana je procjena sličnosti i izdvajanje dana koji su dovoljno slični prognoziranim danima. U ovom radu se koristi jednostavan metod selekcije sličnih dana gdje samo dani sa istim danom u sedmici i temperaturnim rasponom (plus/minus 5 °C u odnosu na predviđenu prosječnu temperaturu prognoziranog dana) kao na dan prognoze ulaze u trening podatke modela prognoze. Rezultati pokazuju da ovakav pristup može znatno smanjiti grešku predviđanja.

Odabir sličnih dana za prognozu opterećenja može da bude jedan od pravaca daljnjeg istraživanja. Potrebno je istražiti uticaj različitih parametara u određivanju sličnih dana, optimalnu udaljenost između prognoziranog dana i sličnih dana, optimalan broj sličnih dana, itd.

Slika 3 prikazuje razliku između ostvarene i predviđene potrošnje u slučaju specijalnih dana. Ovdje možemo uočiti veća odstupanja između predviđenih i ostvarenih vrijednosti u odnosu na obične dane, što je i očekivano. Ovakve dane je neophodno posmatrati odvojeno, loše utiču na tačnost prognoze običnih dana. Takođe, obični dani nisu dobar primjer ulaznih podataka za predviđanje potrošnje za specijalne dane. Zbog toga su specijalni dani tj. naznačeni državni praznici izbačeni iz ulaznog skupa podataka u prethodno razmatranim primjerima.



Slika 3. Prognoza potrošnje za državne praznike

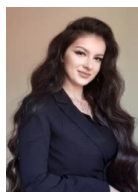
## 5. ZAKLJUČAK

Model kratkoročne prognoze potrošnje električne energije, koji je predstavljen u ovom radu, namjenjen je prognozi u distributivnim sistemima tj. prognozira se potrošnja u više tačaka za najviše sedam dana unaprijed sa rezolucijom od 1h. Prednost ovog modela je primjenjivost u različitim prognozama, uz vrlo male izmjene, jer se pored optimizacije samog algoritma prognoze vrši i optimizacija ulaznih parametara. Analizom podataka, uočeno je da se vremenom mijenja uticaj različitih faktora na zavisnu promjenljivu. Optimalan izbor ulaznih podataka u jednom trenutku ne znači da će taj izbor biti optimalan u različitim okolnostima kao što su npr. socijalni aspekti, godišnja doba, itd.

## 4. LITERATURA

- [1] M. I. Henderson, D. Novosel and M. Crow, "Electric Power Grid Modernization Trends, Challenges, and Opportunities", IEEE Power & Energy Society, November 2017
- [2] H. Zareipour, K. Bhattacharya and C. A. Canizares, "Distributed Generation: Current Status and Challenges" IEEE Proceeding of NAPS 2004, February 2004.
- [3] Q. Yang, J. A. Barria and T. C. Green, "Communication Infrastructures for Distributed Control of Power Distribution Networks," in IEEE Transactions on Industrial Informatics, vol. 7, no. 2, pp. 316-327, May 2011.
- [4] W.-S. Tan, M. Y. Hassan, M. S. Majid, H. A. Rahman: "Optimal distributed renewable generation planning: A review of different approaches", February 2013.
- [5] National Grid ESO: "Future Energy Scenarios", 2020
- [6] K. Clement-Nyns, E. Haesen and J. Driesen, "The Impact of Charging Plug-In Hybrid Electric Vehicles on a Residential Distribution Grid," in IEEE Transactions on Power Systems, vol. 25, no. 1, pp. 371-380, February 2010.

## Kratka biografija:



**Sladana Turudić** rođena je u Doboju 1998. godine. Osnovne akademske studije na Fakultetu tehničkih nauka Univerziteta u Novom Sadu upisala je 2017. godine. Diplomirala je 30.09.2021. godine i iste godine upisala master akademske studije.

kontakt: [sladjana.turudic@gmail.com](mailto:sladjana.turudic@gmail.com)