

## VIŠEKRITERIJUMSKA PROCENA EFIKASNOSTI PAMETNE MREŽE KORIŠĆENJEM METODE FAZI ANALITIČKOG HIJERARHIJSKOG PROCESA

### MULTI-CRITERIA ASSESSMENT OF THE SMART GRID EFFICIENCY USING THE FUZZY ANALYTICAL HIERARCHY PROCESS

Lazar Z. VELIMIROVIĆ, Matematički institut SANU, Beograd, Srbija

Jelena D. VELIMIROVIĆ, Matematički institut SANU, Beograd, Srbija

Aleksandar JANJIĆ, Intec GOPA-International Energy Consultants GmbH, Beograd, Srbija

#### KRATAK SADRŽAJ

Sistem upravljanja energijom razvija se simultano na osnovnom nivou pojedinačnih objekata i na višem nivou mreže za snabdevanje. U ovom radu su analizirani ključni indikatori performansi vezani za efikasnost pametne mreže, kao ključnog faktora implementacije bilo kog sistema upravljanja energijom. Autori predlažu višekriterijumsku metodologiju fazi analitičkog hijerarhijskog procesa za određivanje ukupne efikasnosti pametne mreže. Definisana su četiri kriterijuma (tehnologija, troškovi, zadovoljstvo korisnika i zaštita životne sredine) i sedam performansi (u skladu sa inicijativama EU i SAD za analizu koristi i efekata sistema pametnih mreža) za izbor optimalnog projekta pametne mreže. Analiza pokazuje da su dominantne performanse optimalnog projekta pametne mreže efikasnost, bezbednost i kvalitet snabdevanja. Metodologija je ilustrovana na izboru strategije razvoja pametne mreže za srednju elektrodistributivnu kompaniju.

**Ključne reči:** Sistemi za upravljanje energetsom potrošnjom, fazi AHP, pametna mreža

#### ABSTRACT

The energy management system is developing simultaneously on the base level of individual objects and the higher level of supply network. In this paper, the key performance indicators related to the smart grid efficiency, as the key factor of any energy management system implementation have been analysed. The authors are proposing multi-criteria fuzzy AHP methodology for the determination of overall smart grid efficiency. Four criteria (technology, costs, user satisfaction, and environmental protection) and seven performances (according to EU and US initiatives for analysis of benefits and effects of smart grid systems) for selection of optimal smart grid project are defined. The analysis shows that the dominant performances of the optimal smart grid project are efficiency, security and quality of supply. The methodology is illustrated on the choice of smart grid development strategy for the medium size power distribution company.

**Key words:** Energy management system, Fuzzy AHP, Smart Grid

Lazar Velimirović, lazar.velimirovic@mi.sanu.ac.rs

#### 1. UVOD

Sistem upravljanja energijom je skup međusobno povezanih ili interaktivnih elemenata koji se koriste za uspostavljanje energetske politike i ciljeva i za postizanje tih ciljeva. Takav sistem se uspostavlja na različitim nivoima: organizacija, lokalna zajednica i država. Sistem upravljanja energijom na nivou organizacije je definisan standardom ISO 50001 [1]. Standard specificira zahteve za uspostavljanje, implementaciju, održavanje i unapređenje sistema upravljanja energijom, koji omogućava organizaciji da kontinuirano unapređuje energetska efikasnost i energetske performanse. Na višem nivou, povećanje indikatora energetske efikasnosti je snažno zavisno od efikasnosti proizvodnih, prenosnih i distributivnih kompanija, koje integrišu te napore kroz koncept pametne mreže.

Pametna mreža se obično definiše kao električna mreža koja inteligentno integriše akcije svih korisnika povezanih u njoj – proizvođača, potrošača i onih koji su oboje, sa ciljem efikasne proizvodnje električne energije i njenog održivog, ekonomičnog i bezbednog isporučivanja. Pametna mreža obećava niz poboljšanja efikasnosti za komunalne usluge, kao što je smanjenje gubitaka na distributivnim linijama minimizacijom reaktivne snage i preciznijom kontrolom napona. Dalje, pametna mreža treba da unapredi sposobnost komunalnih preduzeća da nadgledaju i mere efikasnost programa energetske efikasnosti krajnje potrošnje i da bolje upravljaju troškovima energije na strani potrošača, što potvrđuju brojni projekti i organizacije koje su inicirane radi olakšavanja evolucije pametne mreže [2,3].

U Evropskoj uniji, koncept pametnih mreža je usvojen 2005. godine, kao zvaničan dokument Evropske komisije kroz Evropsku tehnološku platformu za pametne mreže i preciznije je definisan u [4] i [5]. Početkom aprila 2010. godine, Evropska komisija je izdala izjavu ponovo naglašavajući potrebu za unapređenjem postojećih mreža, navodeći sledeće kao glavne ciljeve [6]: povećanje upotrebe obnovljivih izvora električne energije, sigurnost mreže, očuvanje energije i energetska efikasnost i deregulisano energetska tržište. Stoga, strategija za održivu, konkurentnu i sigurnu energiju prvenstveno podrazumeva: konkurentnost, upotrebu različitih izvora energije, održivost, inovacije i tehnološki napredak [7]. Rezultat razvoja energetske sistema se ogleda u energetskim performansama, sa kvantifikovanim rezultatima koji se odnose na energiju (npr. energetska efikasnost, energetska intenzivnost ili specifična potrošnja energije) i indikatore energetskih performansi kao kvantitativne indekse energetskih performansi.

Ključni indikatori energetskih performansi su definisani 2005. godine kao rezultat saradnje nekoliko međunarodnih organizacija – globalnih lidera u energetskim i ekološkim statistikama i analizama: Međunarodna agencija za atomsku energiju (IAEA), Odeljenje Ujedinjenih nacija za ekonomske i socijalne poslove (DESA), Međunarodna energetska agencija (IEA), Evropska agencija za životnu sredinu (EEA) i Direktorat za statistiku Evropske komisije – Eurostat [8]. Ključni indikatori energetskih performansi uključuju skup od 30 indikatora koji čine 4 socijalna indikatora, 16 ekonomskih indikatora i 10 ekoloških indikatora. Vrednosti indeksa energetske sigurnosti SAD su određene na osnovu podataka za period između 1970. i 2010. godine, i predviđene za period između 2011. i 2035. godine [9]. Vrednosti indikatora ne predstavljaju samo podatke, već osnovu za komunikaciju između zainteresovanih strana o održivoj upotrebi energije. Svaki skup indikatora (socijalni, ekonomski ili ekološki) izražava specifične aspekte ili uticaje proizvodnje i upotrebe energije.

U kontekstu pametnih mreža, predstavljena su tri glavna okvira za procenu zasnovana na ključnim indikatorima performansi (KPI). Radna grupa EC za pametne mreže je predstavila karakteristike idealnih pametnih mreža (usluge) i rezultate implementacije idealne pametne mreže (koristi) [10,11]. Merilo doprinosa projekata idealnoj pametnoj mreži je kvantifikovano u terminima koristi preko skupa KPI. Evropska inicijativa za električnu mrežu je podelila idealni sistem pametne mreže na tematske oblasti (klastere) i trenutno mapira projekte pametne mreže u klastere [6]. U SAD, idealne karakteristike pametne mreže i skup metrika za merenje napretka ka idealnim pametnim mrežama su definisani [12]: metrike koje opisuju attribute koji su ugrađeni kao podrška pametnoj mreži (npr. procenat stanica koje koriste automatizaciju) i metrike vrednosti ili uticaja koje opisuju vrednost koja može proizaći iz postizanja pametne mreže (npr. procenat energije potrošene za proizvodnju električne energije koja se ne gubi, ili količina električne energije isporučena potrošačima u odnosu na proizvedenu električnu energiju izraženu kao procenat).

Ovaj rad predlaže novi algoritam za izbor najbolje strategije upravljanja energijom kroz koncept pametne mreže, koji koristi metodu fazi analitičkog hijerarhijskog procesa za viškriterijumsko donošenje odluka. Na osnovu podudaranja alternativa, metoda određuje optimalni skup aktivnosti za planiranje distributivnog sistema. Dokazali smo da je metoda veoma uspešna u evaluaciji alternativa u prisustvu heterogenih kriterijuma. Nakon kratkog pregleda ključnih indikatora performansi za evaluaciju pametne mreže, predstavljena je metodologija FAHP. Metodologija je ilustrovana na izboru implementacije projekata pametne mreže za jednu srednju elektrodistributivnu kompaniju.

## 2. METODOLOGIJA

Implementacija pametne mreže je korisna za postizanje strateških ciljeva politike, kao što su glatka integracija obnovljivih izvora energije, sigurnije i održivije snabdevanje električnom energijom, potpuna uključenost potrošača u tržište električne energije, pomažući im da bolje razumeju sopstvenu potrošnju energije, što zauzvrat omogućava potrošačima da identifikuju mogućnosti za uštedu energije. Upravljanje tranzicijom ka pametnoj mreži je izazovan, dugoročan zadatak, koji zahteva balansiranje energetskih ciljeva politike, ekoloških ograničenja i profitabilnosti tržišta. Iz ove perspektive, prvi pristup u proceni pametne mreže je da se oceni u kojoj meri projekti pametne mreže doprinose napretku ka „idealnoj pametnoj mreži“ i njenim očekivanim rezultatima (npr. održivost, efikasnost, uključenost potrošača), koji su direktno povezani sa ciljevima politike koji su inicirali tranziciju ka pametnoj mreži. Drugi komplementarni pristup je procena profitabilnosti rešenja i investicija u pametne mreže kroz odgovarajuću metodologiju viškriterijumske analize.

Formulisanjem skupa ključnih indikatora performansi (KPI) i primenom tih indikatora na elektroenergetsku mrežu može se meriti napredak razvoja pametne mreže. U [11-13] definisane su karakteristike idealnih pametnih mreža i metrika za merenje napretka i rezultata koji proizlaze iz implementacije projekata pametne mreže. Radna grupa EC za pametne mreže identifikovala je listu koristi koje proističu iz implementacije pametne mreže [11]: (1) povećana održivost; (2) adekvatan kapacitet prenosnih i distributivnih mreža za „prikupljanje“ i dostavljanje električne energije potrošačima; (3) adekvatan priključak i pristup mreži za sve vrste korisnika mreže; (4) zadovoljavajući nivoi sigurnosti i kvaliteta snabdevanja; (5) poboljšana efikasnost i bolja usluga u snabdevanju električnom energijom i radu mreže; (6) efektivna podrška transnacionalnim tržištima električne energije kontrolom protoka opterećenja za ublažavanje povratnih tokova i povećanjem kapaciteta međusobnih veza; (7) koordinisani razvoj mreže kroz zajedničko evropsko, regionalno i lokalno planiranje mreže za optimizaciju infrastrukture prenosne mreže; (8) poboljšana svest potrošača i učešće na tržištu od strane novih aktera; (9) omogućavanje potrošačima da donose informisane odluke u vezi sa svojom energijom kako bi ispunili ciljeve EU za energetska efikasnost; (10) kreiranje tržišnog mehanizma za nove energetske usluge kao što su energetska efikasnost ili energetska savetovanja za kupce; (11) računi potrošača su ili smanjeni ili je pritisak na njihovo povećanje ublažen.

Svaka korist je izražena kroz skup KPI koji uključuju i kvantitativne i kvalitativne indikatore. Kompletan lista indikatora može se naći u [11]. KPI mogu biti primenjeni za evaluaciju rezultata projekata pametnih mreža. Jasno definisan okvir može konkretizovati gde je tačno projekat doprineo pametnoj elektroenergetskoj mreži. Mešavina kvantitativnih i kvalitativnih indikatora je jedan od glavnih razloga za uvođenje tehnika viškriterijumske analize odlučivanja. Drugi razlog je nedostatak analize koristi i troškova, što će biti objašnjeno u nastavku.

Da bi se dobilo sveobuhvatno razumevanje statusa razvoja pametne mreže, mogu se definisati glavni SMART kriterijumi (moraju biti specifični, merljivi, dostupni, relevantni i vremenski ograničeni). Polazeći od jedanaest glavnih koristi, može se definisati adaptirana lista glavnih kriterijuma, uključujući: (1) tehnologiju, koja pokriva sve aspekte naprednih usluga i novih zahteva nametnutih distributivnoj i prenosnoj mreži; (2) troškove; (3) zadovoljstvo kupaca, obuhvatajući različite opcije izbora potrošača, nove energetske usluge i učešće na tržištu; (4) uticaj na životnu sredinu.

Viškriterijumske metode se razlikuju po načinu na koji tretiraju ideju više kriterijuma. Svaka metoda pokazuje svoje osobine u pogledu načina procene kriterijuma, primene i izračunavanja težina, matematičkog algoritma koji se koristi, modela za opisivanje sistema preferencija donosioca odluka i konačno, nivoa neizvesnosti ugrađene u skup podataka.

Zbog glavne karakteristike usvojenog okvira za evaluaciju pametne mreže i njegove složene hijerarhijske strukture, predložili smo metodologiju fazi analitičke hijerarhijske analize za evaluaciju projekata, strukturisajući odluku u hijerarhiju kriterijuma, podkriterijuma i alternativa. Analiza osetljivosti može se primeniti za testiranje robusnosti prioriteta. Glavne karakteristike ove metodologije predstavljene su u nastavku.

Originalnu AHP metodu razvio je Tomas L. Sati krajem 1970-ih [14]. U ovoj metodi, ljudske procene su predstavljene kao oštre vrednosti. Međutim, u mnogim praktičnim slučajevima model ljudske preferencije je neizvestan i donosioci odluka ne mogu da dodele precizne vrednosti procenama poređenja. U tim slučajevima je korisna implementacija fazi AHP metode. Metoda fazi AHP je dizajnirana da poboljša podršku pri odlučivanju za neizvesne procene i prioritete. U ovoj metodi se podaci i preferencije stručnjaka ocenjuju u okruženju fazi skupova [15]. Korišćenje teorije fazi skupova omogućava donosiocima odluka da u model odlučivanja uključe nekvantifikovane informacije, nepotpune informacije, neobuhvatljive informacije i delimično ignorisane činjenice [16]. Mnogi autori su koristili fazi AHP metodu za rešavanje problema u različitim oblastima. Neki od primera uspešne primene fazi AHP metode opisani su u [17-24].

U ovom radu se fazi AHP metoda koristi za rangiranje i selekciju projekata pametne mreže, upravo zbog mnogih neizvesnih i neopipljivih koristi i kriterijuma uključenih u procenu projekata pametne mreže. U ovoj studiji, fazi AHP metoda se primenjuje na rangiranje projekata pametne mreže, kao što je prikazano u nastavku:

1. Identifikacija ciljeva. Cilj je rangirati tri projekta pametne mreže.
2. Identifikacija kriterijuma, podkriterijuma i alternativa. Kriterijumi za izbor projekata pametne mreže su: tehnologija, troškovi, zadovoljstvo korisnika i zaštita životne sredine. Podkriterijumi su performanse projekta: održivost, kapacitet prenosnih i distributivnih mreža za „prikupljanje“ i dostavljanje električne energije potrošačima, mogućnost priključenja na mrežu i pristup za sve vrste korisnika mreže, sigurnost i kvalitet snabdevanja, efikasnost i dobra usluga u snabdevanju električnom energijom i radu mreže, efektivna podrška transnacionalnim projektima i tržištima električne energije, transparentne informacije za potrošače. Konačno, projekti pametne mreže su identifikovani kao alternative.
3. Formiranje hijerarhijske strukture. Metod fazi AHP predstavlja problem u obliku hijerarhije: prvi nivo predstavlja cilj; drugi nivo razmatra relevantne kriterijume (četiri identifikovana kriterijuma); treći nivo razmatra relevantne podkriterijume (sedam identifikovanih podkriterijuma); i četvrti nivo definiše projekte pametne mreže (tri projekta).

4. Poređenje parova. Parovi elemenata na svakom nivou se porede prema njihovom relativnom doprinosu elementima na hijerarhijskom nivou iznad, koristeći fazifikovanu Satijevu skalu [14].
5. Evaluacija vektora prioriteta težina. Procedura rangiranja počinje određivanjem vektora težina kriterijuma:

$$W_c = (w_{c_1}, w_{c_2}, w_{c_3}, w_{c_4})^T. \quad (1)$$

Elementi vektora težina kriterijuma određuju se kao:

$$w_{c_i} = \sum_{j=1}^4 \tilde{a}_{ij} \otimes \left[ \sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^4 \tilde{a}_{ij} \right]^{-1}, \quad i=1,2,3,4. \quad (2)$$

Vektori težina performansi se definišu poređenjem performansi parova prema svakom pojedinačnom kriterijumu. Odgovarajući elementi ovog vektora se računaju na sledeći način:

$$x_{ij} = \sum_{j=1}^4 \tilde{a}_{ij} \otimes \left[ \sum_{l=1}^7 \sum_{j=1}^4 \tilde{a}_{lj} \right]^{-1}, \quad (3)$$

gde  $x_{ij}$  predstavlja fazi težine  $i$ -te performanse u odnosu na  $j$ -ti kriterijum. Konačne težine performansi se dobijaju agregacijom težina na dva uzastopna nivoa, tj. množenjem težina performansi sa težinama kriterijuma:

$$W_{sc} = X \otimes W_c = (w_{sc_1}, w_{sc_2}, w_{sc_3}, w_{sc_4}, w_{sc_5}, w_{sc_6}, w_{sc_7})^T. \quad (4)$$

Konačno, projekti pametne mreže se porede prema relevantnim performansama. Odgovarajuće težine projekata za pojedinačne performanse se određuju na sledeći način:

$$y_{ij} = \sum_{j=1}^7 \tilde{a}_{ij} \otimes \left[ \sum_{l=1}^3 \sum_{j=1}^7 \tilde{a}_{lj} \right]^{-1}, \quad (5)$$

gde  $y_{ij}$  predstavlja fazi težine  $i$ -tog projekta u odnosu na  $j$ -tu performansu. Konačne težine projekata pametne mreže se dobijaju množenjem težina projekata sa konačnim težinama performansi:

$$W_a = Y \otimes W_{sc} = (w_{a_1}, w_{a_2}, w_{a_3})^T. \quad (6)$$

6. Defazifikacija i konačno rangiranje alternativa. U ovom radu se rangiranje trougaonih fazi brojeva vrši primenom metode totalne integralne vrednosti. Ova metoda se koristi za rangiranje projekata pametne mreže prema umerenoj i optimističkoj sklonosti prema riziku.

### 3. NUMERIČKI REZULTATI

Predložena metodologija je ilustrovana izborom prave strategije za implementaciju pametne mreže u srednjoj elektrodistributivnoj kompaniji. Kompanija snabdeva 50.000 potrošača, a lista alternativa sa opisom predloženih akcija i odgovarajućim indikatorima data je u Tabeli 1.

Tabela 1 - Različite razvojne alternative

Br	Opis predložene akcije	Indikator performansi	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3
1	Instalacija naprednih brojila	Broj instaliranih naprednih brojila	20.000	10.000	5.000
2	Automatizacija trafostanica	Procenat trafostanica koje primenjuju tehnologije automatizacije	20%	30%	40%
3	Uvođenje tehnologije dinamičkog opterećenja vodova	Broj vodova koji rade pod dinamičkim opterećenjem Procenat kilometara prenosnih vodova koji rade pod dinamičkim opterećenjem	2 15%	3 20%	4 15%
4	Povezivanje solarne elektrane	Ukupna instalirana snaga (MW)	3	5	7

Tri alternative su ocenjivane, obuhvatajući četiri aktivnosti uvođenja novih tehnologija u distributivnu mrežu: zamena starih brojila daljinski očitavanim brojlama; daljinsko upravljanje i uvođenje trafostanica u SCADA sistem; dinamičko opterećenje prenosnih linija; izgradnja nove fotonaponske elektrane unutar distributivne mreže.

Sve aktivnosti su planirane unutar približno istog budžeta od 5.000.000,00 € i planeri su predložili tri različite strategije razvoja. Korišćenjem predstavljene metodologije, pet stručnjaka (iz oblasti tehnologija pametnih mreža i višekriterijumskog odlučivanja) rangirali su tri projekta pametnih mreža čije karakteristike su prikazane u Tabeli 2.

Predloženi skup akcija donosi određene kvalitativne i kvantitativne koristi. Na primer, povećan broj instaliranih naprednih brojila u prvoj alternativni će značajno uticati na adekvatno priključenje na mrežu zbog poboljšanog upravljanja niskonaponskom mrežom i transparentne informacije za potrošače. Kvantitativni agregirani indikatori performansi za različite alternative su izračunati i predstavljeni u Tabeli 2. Iako izračunavanje ovih parametara nije u fokusu ovog rada, veza između predloženih akcija i očekivanih rezultata je očigledna. Smanjenje gubitaka energije je rezultat dinamičkog opterećenja linija koje omogućava ekonomičnije opterećenje linija i povezivanje fotonaponske elektrane (red 1). Ovaj obnovljivi izvor smanjuje emisiju ugljen-dioksida u skladu sa instaliranom snagom elektrane (red 2). Konačno, automatizacija trafostanica smanjuje verovatnoću povreda tokom manipulacije opremom (red 3).

Tabela 2 - Kvantitativni agregirani indikatori performansi za različite alternative

Br	Indikator performansi	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3
1	Smanjenje gubitaka energije [MWh/god]	3.000	8.000	11.000
2	Kvantifikovano smanjenje emisije ugljen-dioksida (t)	5.400	14.000	19.000
3	Smanjenje verovatnoće povreda [%]	10	15	20

Eksperti su prvo izvršili poređenje parova sledećih kriterijuma: tehnologija ( $C_1$ ), troškovi ( $C_2$ ), zadovoljstvo korisnika ( $C_3$ ) i zaštita životne sredine ( $C_4$ ) (Tabela 3).

Tabela 3 - Poređenje parova, fazi težine, konačne težine i rangovi kriterijuma

	$C_1$	$C_2$	$C_3$	$C_4$	Fazi težines $w_{ci}$	$\lambda=0.5$		$\lambda=1.0$	
						FWs	Rang	FWs	Rang
$C_1$	$\tilde{1}$	$\tilde{3}$	$\tilde{5}$	$\tilde{5}$	(0.1967, 0.5303, 1.3141)	0.5096	1	0.5023	1
$C_2$	$\tilde{3}^{-1}$	$\tilde{1}$	$\tilde{3}$	$\tilde{3}$	(0.0787, 0.2778, 0.7885)	0.2819	2	0.2904	2
$C_3$	$\tilde{5}^{-1}$	$\tilde{3}^{-1}$	$\tilde{1}$	$\tilde{1}$	(0.0576, 0.0960, 0.3504)	0.1189	3	0.1216	3
$C_4$	$\tilde{5}^{-1}$	$\tilde{3}^{-1}$	$\tilde{1}^{-1}$	$\tilde{1}$	(0.0412, 0.0960, 0.2190)	0.0896	4	0.0858	4

Zatim su eksperti uporedili sledeće indikatore performansi u odnosu na svaki kriterijum: održivost ( $SC_1$ ), kapacitet prenosnih i distributivnih mreža za „prikupljanje“ i dostavljanje električne energije potrošačima ( $SC_2$ ), mogućnost priključenja na mrežu i pristup za sve vrste korisnika mreže ( $SC_3$ ), sigurnost i kvalitet snabdevanja ( $SC_4$ ), efikasnost i dobra usluga u snabdevanju električnom energijom i radu mreže ( $SC_5$ ), efektivna podrška transnacionalnim projektima i tržištima električne energije ( $SC_6$ ), transparentne informacije za potrošače ( $SC_7$ ). Ovaj korak je neophodan zbog različitih ekonomskih, socijalnih i političkih uslova za različite distributivne kompanije. Kao što je navedeno, poređenje parova koje su stručnjaci izvršili je obavljeno kako putem kvalitativnih tako i kvantitativnih indikatora. Na primer, kriterijum sigurnosti ( $SC_4$ ) može biti podržan smanjenjem povreda (Tabela 2), dok je kriterijum razvoja tržišta ( $SC_6$ ) mnogo podložniji subjektivnim procenama stručnjaka.

Konačni vektor fazi težina performansi projekata je:

$$W_{sc} = X \otimes W_c = [x_{ij}]_{7 \times 4} \otimes [w_{ci}]_{4 \times 1} = [w_{sc_i}]_{7 \times 1} = \begin{bmatrix} (0.0120, 0.0850, 0.5756) \\ (0.0204, 0.1523, 1.0094) \\ (0.0127, 0.0672, 0.5231) \\ (0.0374, 0.2334, 1.5294) \\ (0.0305, 0.2127, 1.2984) \\ (0.0194, 0.4113, 0.9951) \\ (0.0173, 0.1082, 0.7221) \end{bmatrix} \quad (7)$$

Na kraju, tri projekta pametne mreže (Projekat 1 [ $A_1$ ], Projekat 2 [ $A_2$ ] i Projekat 3 [ $A_3$ ]) su predstavljena u Tabeli 4.

Tabela 4 - Poređenje alternativa u odnosu na performanse

SC	A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	A <sub>3</sub>	Fazi težine $y_{ij}$
SC <sub>1</sub>	A <sub>1</sub>	$\tilde{1}$	$\tilde{3}^{-1}$	$\tilde{5}^{-1}$ (0.0601,0.1031,0.2731)
	A <sub>2</sub>	$\tilde{3}$	$\tilde{1}$	$\tilde{3}^{-1}$ (0.0985,0.2915,0.8194)
	A <sub>3</sub>	$\tilde{5}$	$\tilde{3}$	$\tilde{1}$ (0.2239,0.6054,1.5217)
SC <sub>2</sub>	A <sub>1</sub>	$\tilde{1}$	$\tilde{1}$	$\tilde{1}$ (0.2000,0.3333,1.0000)
	A <sub>2</sub>	$\tilde{1}^{-1}$	$\tilde{1}$	$\tilde{1}$ (0.1556,0.3333,0.7143)
	A <sub>3</sub>	$\tilde{1}^{-1}$	$\tilde{1}^{-1}$	$\tilde{1}$ (0.1111,0.3333,0.4286)
SC <sub>3</sub>	A <sub>1</sub>	$\tilde{1}$	$\tilde{3}$	$\tilde{5}$ (0.2239,0.6054,1.5217)
	A <sub>2</sub>	$\tilde{3}^{-1}$	$\tilde{1}$	$\tilde{3}$ (0.0985,0.2915,0.8194)
	A <sub>3</sub>	$\tilde{5}^{-1}$	$\tilde{3}^{-1}$	$\tilde{1}$ (0.0601,0.1031,0.2731)
SC <sub>4</sub>	A <sub>1</sub>	$\tilde{1}$	$\tilde{1}$	$\tilde{3}^{-1}$ (0.1158,0.2000,0.7426)
	A <sub>2</sub>	$\tilde{1}^{-1}$	$\tilde{1}$	$\tilde{3}^{-1}$ (0.0807,0.2000,0.4455)
	A <sub>3</sub>	$\tilde{3}$	$\tilde{3}$	$\tilde{1}$ (0.1579,0.6000,1.6337)
SC <sub>5</sub>	A <sub>1</sub>	$\tilde{1}$	$\tilde{1}$	$\tilde{3}^{-1}$ (0.1158,0.2000,0.7426)
	A <sub>2</sub>	$\tilde{1}^{-1}$	$\tilde{1}$	$\tilde{3}^{-1}$ (0.0807,0.2000,0.4455)
	A <sub>3</sub>	$\tilde{3}$	$\tilde{3}$	$\tilde{1}$ (0.1579,0.6000,1.6337)
SC <sub>6</sub>	A <sub>1</sub>	$\tilde{1}$	$\tilde{1}$	$\tilde{3}^{-1}$ (0.0667,0.1282,0.4545)
	A <sub>2</sub>	$\tilde{1}^{-1}$	$\tilde{1}$	$\tilde{3}^{-1}$ (0.1048,0.3333,1.0606)
	A <sub>3</sub>	$\tilde{3}$	$\tilde{3}$	$\tilde{1}$ (0.1429,0.5385,1.6667)
SC <sub>7</sub>	A <sub>1</sub>	$\tilde{1}$	$\tilde{5}^{-1}$	$\tilde{5}^{-1}$ (0.0593,0.0909,0.1570)
	A <sub>2</sub>	$\tilde{5}$	$\tilde{1}$	$\tilde{1}$ (0.2308,0.4545,1.0359)
	A <sub>3</sub>	$\tilde{5}$	$\tilde{1}^{-1}$	$\tilde{1}$ (0.2000,0.4545,0.8475)

Konačni vektor fazi težina za projekte pametnih mreža je:

$$W_a = Y \otimes W_{sc} = [y_{ij}]_{3 \times 7} \otimes [w_{sc_i}]_{7 \times 1} = \begin{bmatrix} (0.0168, 0.2079, 4.5137) \\ (0.0136, 0.2445, 4.1205) \\ (0.0190, 0.4394, 7.4556) \end{bmatrix} \quad (8)$$

Nakon defazifikacije konačnih vektora težina performansi i projekata, performanse i projekti pametne mreže se rangiraju. Rezultati rangiranja su prikazani u Tabeli 5 (FWs su konačne težine).

Tabela 5 - Rangiranje performansi projekata i projekata pametne mreže.

	$\lambda=0.5$		$\lambda=1.0$	
	FWs	Rang	FWs	Rang
<b>Performanse projekata</b>				
Održivost (SC <sub>1</sub> )	0.0861	6	0.0863	6
Kapacitet prenosne i distributivne mreže za „sakupljanje“ i dovođenje električne energije do potrošača (SC <sub>2</sub> )	0.1516	3	0.1518	3
Mogućnost povezivanja na mrežu i pristup za sve vrste korisnika mreže (SC <sub>3</sub> )	0.0761	7	0.0771	7
Sigurnost i kvalitet snabdevanja (SC <sub>4</sub> )	0.2310	1	0.2303	1
Efikasnost i dobra usluga u snabdevanju električnom energijom i radu mreže (SC <sub>5</sub> )	0.1993	2	0.1974	2
Efektivna podrška transnacionalnim projektima i tržištima električne energije (SC <sub>6</sub> )	0.1473	4	0.1485	4
Transparentne informacije za potrošače (SC <sub>7</sub> )	0.1086	5	0.1085	5
<b>Projekti pametne mreže</b>				
Projekat 1 (A <sub>1</sub> )	0.2669	2	0.2781	2
Projekat 2 (A <sub>2</sub> )	0.2580	3	0.2570	3
Projekat 3 (A <sub>3</sub> )	0.4661	1	0.4647	1

Na osnovu prethodnih rezultata, možemo zaključiti sledeće:

1. Najvažniji kriterijum za izbor pametne mreže (za ovu konkretnu distributivnu kompaniju) je odabrana tehnologija, zatim troškovi, zadovoljstvo korisnika i zaštita životne sredine. Napredna tehnologija povećava efikasnost i sigurnost snabdevanja energijom visokih performansi, što povećava zadovoljstvo korisnika i štiti životnu sredinu.
2. U odnosu na tehnologiju, najbolje rangirana performansa je sigurnost i kvalitet snabdevanja; u odnosu na troškove - mreže za „sakupljanje“ i dovođenje električne energije do potrošača; u odnosu na zadovoljstvo korisnika - mogućnost povezivanja na mrežu i pristup za sve vrste korisnika mreže; i u odnosu na zaštitu životne sredine - održivost.
3. Konačno rangiranje performansi projekata, zasnovano na svim kriterijumima, je:  
(1) sigurnost i kvalitet snabdevanja; (2) efikasnost i dobra usluga u snabdevanju električnom energijom i radu mreže; (3) kapacitet prenosne i distributivne mreže za „sakupljanje“ i dovođenje električne energije do potrošača; (4) efektivna podrška transnacionalnim projektima i tržištima električne energije; (5) transparentne informacije za potrošače; (6) održivost; (7) mogućnost povezivanja na mrežu i pristup za sve vrste korisnika mreže. Najbolje rangirane performanse (sigurnost i kvalitet snabdevanja, i efikasnost i dobra usluga u snabdevanju električnom energijom i radu mreže) podržane su naprednom tehnologijom.
4. Konačni rang alternativa pokazuje da najviši rang ima Projekat 3 ( $A_3$ ), zatim Projekat 2 ( $A_2$ ) dok najniži prioritet ima Projekat 1 ( $A_1$ ). To znači da za implementaciju pametne mreže treba odabrati Projekat 3 ( $A_3$ ).

#### 4. ZAKLJUČAK

U ovom radu, polazeći od opšteg skupa pokazatelja performansi pametne mreže, uspostavljen je novi okvir za procenu efikasnosti pametne mreže, kao jedan od glavnih uslova za uspešnu implementaciju bilo kog programa upravljanja energijom. Koristeći fazi AHP metodologiju sa četiri glavna kriterijuma i šest potkriterijuma izvedenih iz usvojenog skupa prednosti pametne mreže, dokazali smo da je metoda vrlo uspešna u evaluaciji alternativa u prisustvu heterogenih kriterijuma. Ova metoda omogućava donosiocima odluka da uključe nekvantifikovane informacije, nepotpune informacije, nedostupne informacije i delimično nepoznate činjenice u model odlučivanja.

Predložena metodologija je ilustrovana na izboru prave strategije za uvođenje pametne mreže u srednjoj elektrodistributivnoj kompaniji. Analiza pokazuje da su dominantne performanse optimalnog projekta pametne mreže izabrana tehnologija, zatim troškovi, zadovoljstvo korisnika i zaštita životne sredine. Ova metodologija je primenjena na opštu procenu efikasnosti pametne mreže, dok će dalja istraživanja biti fokusirana na posebne aspekte implementacije projekta.

#### ZAHVALNICA

Ovaj rad je objavljen uz podršku Ministarstva nauke, tehnološkog razvoja i inovacija Matematičkom institutu SANU.

#### LITERATURA

- [1] International Organization for Standardization, 2011, ISO 50001, Energy Management Systems-requirements with Guidance to Use.
- [2] European Commission, 2009, R&D investment in the priority technologies of the SET-plan, SEC, 1296.
- [3] ENTSO-E and the European Associations representing DSOs (CEDEC, E.DSO, Eurelectric, GEODE), 2021, Roadmap on the Evolution of the Regulatory Framework for Distributed Flexibility.
- [4] European Commission, 2005, Toward Smart Power Networks, Lessons learned from European research FP5 projects.
- [5] European Commission, 2007, Strategic Research Agenda for Europe Electricity Networks of the Future European Technology Platform.
- [6] European Commission, 2010, Strategic Deployment Document for Europe Electricity Networks of the Future European Technology Platform.
- [7] European Network for the Security of Control and Real Time Systems, 2011, R&D and Standardization Road Map, final deliverable 3.2.
- [8] European Commission, 2020, Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions, Energy 2020, A strategy for competitive, sustainable and secure energy.

- [9] Global Energy Institute, 2020, Index of U.S. Energy Security Risk, Assessing America's Vulnerabilities in a Global Energy Market.
- [10] European Commission, 2018, Smart Grids Task Force, Expert Group 2, Cybersecurity, Recommendations to the European Commission for the Implementation of a Network Code on Cybersecurity
- [11] European Commission Task Force for Smart Grids, 2010, Expert Group 3: Roles and responsibilities.
- [12] U.S. Department of Energy (DOE), 2010, Guidebook for ARRA SGGP/RDSI Metrics and Benefits, DOE Report.
- [13] Dupont B, Meeus L. and Belmans R, 2010, Measuring the "Smartness" of the Electricity Grid, 7<sup>th</sup> International Conference on the Energy Market (EEM), pp. 1-6.
- [14] Saaty T. L, 1980, The Analytic Hierarchy Process, New York: McGraw-Hill.
- [15] Duru O, Bulut E and Yoshida S, 2012, Regime Switching Fuzzy AHP Model for Choice-varying Priorities Problem and Expert Consistency Prioritization: A Cubic Fuzzy-priority Matrix Design, Expert Systems with Applications, vol. 39, pp. 4954-4964.
- [16] Kulak O, Durmusoglu B and Kahraman C, 2005, Fuzzy Multi-attribute Equipment Selection based on Information Axiom, Journal of Materials Processing Technology, vol. 169, pp. 337-345.
- [17] Srdjevic B and Medeiros Y, 2008, Fuzzy AHP Assessment of Water Management Plans, Water Resources Management, vol. 22, pp. 877-894.
- [18] Janjić A, Savić S, Velimirović L, Nikolić V, 2015, Renewable Energy Integration in Smart Grids-multicriteria Assessment using the Fuzzy Analytical Hierarchy Process, Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences, vol. 23, no. 6, pp. 1896-1912.
- [19] Liu Y, Eckert C. M, Earl C, 2020, A Review of Fuzzy AHP Methods for Decision-making with Subjective Judgements, Expert Systems with Applications, vol. 161, 113738.
- [20] Chang D. Y, 1996, Applications of the Extent Analysis Method on Fuzzy AHP, European Journal of Operational Research, vol. 95, no. 3, pp. 649-655.
- [21] Janjić A, Velimirović L, Velimirović J, 2023, Multi-criteria Home Energy Management System Selection for the Smart Grid Support, Facta Universitatis, Series: Electronics and Energetics, vol. 36, no. 4, pp. 533-551.
- [22] Spanidis P. M, Roumpos C, Pavludakis F, 2021. A Fuzzy-AHP Methodology for Planning the Risk Management of Natural Hazards in Surface Mining Projects, Sustainability, vol. 13, no. 4, 2369.
- [23] Karatop B, Taşkan B, Adar E, Kubat C, 2021, Decision Analysis Related to the Renewable Energy Investments in Turkey based on a Fuzzy AHP-EDAS-Fuzzy FMEA Approach, Computers & Industrial Engineering, vol. 151, 106958.
- [24] Velimirović L, Janjić A, Velimirović J, 2023, Multi-criteria Decision Making for Smart Grid Design and Operation: A Society 5.0 Perspective. Springer Nature.